INVESTIGACION y CIENCIA

DESACTIVACION DE LOS MISILES NUCLEARES

RESOLUCION DEL TEOREMA DE FERMAT

MEJORA GENETICA DE LOS CULTIVOS ESENCIALES

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MERCURIO, PLANETA OLVIDADO



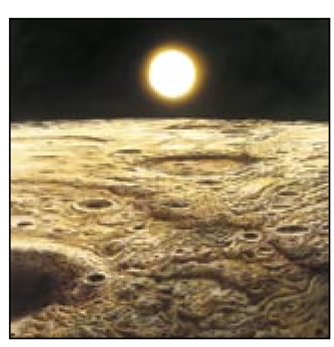
ENERO 1998
800 PTAS.



Enero de 1998 Número 256

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Don Dixon

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Don Dixon
6-7	NASA (*fotografías*); Slim Films (*ilustración*)
8	Alfred T. Kamajian, cortesía de P. H. Schultz y D. E. Gault (*arriba*); NASA (*abajo*)
9	NASA
10-11	NASA; Slim Films
12-13	Bryan Christie
14	Robert Genat, *Arms Communications*
15	Adolph Brotman
16	Sovfoto/Eastfoto
17	Bryan Christie
18	CNES; licencia de Spot Image Corp., *Photo Researchers*
20	Granger Collection; Biblioteca Universidad Brown, composición digital de Slim Films
21	Gamma Liaison, Slim Films
22	Granger Collection; Biblioteca Universidad Brown, composición digital de Slim Films
23	Steve Murez, *Black Star*; Slim Films (*abajo*); cortesía de la Universidad de Princeton, Slim Films (*arriba*)
24	Cortesía de Gerhard Frey, Slim Films (*arriba*); Catherine Karnow, Slim Films (*abajo*)
25	Denise Applewhite, *Sygma*
28	Jessica Boyatt
29	Bryan Christie
46-47	Roberto Osti
48	Laura Rogers, Steven H. Harwood (*micrografías superior e inferior*); Mark D. Lavine (*micrografía central*)
50-51	Roberto Osti
54	Jana Brenning
56-58	James Gary
59	Jeffrey O. Kephart
62-63	Jason Laure
64-65	Charles y Josette Lenars, Corbis (*a*), Robert Holmes (*b, d* y *f*), David Reed (*c*) y Cordaiy Photo Library Ltd. (*e*); Johnny Johnson (*abajo*)
66	Robert Holmes, *Corbis*
67	Paul Almasy, *Corbis*
68-71	Richard Jones
72	Jeff Hall, Universidad de California en Davis
73	Jennifer C. Christiansen
75-81	José Miguel Barea
82-83	Michael Goodman
84-85	Jennifer C. Christiansen
88	Dusan Petricic
96	Ian Worpole

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Mónica Murphy: *Mercurio: el planeta olvidado*; J. Vilardell: *El riesgo real de las armas nucleares, Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *El último reducto de Fermat* y *Juegos matemáticos*; Xavier Bellés: *El arma secreta de las avispas parásitas*; José Manuel García de la Mora: *Gran Zimbabwe*; Victoria Laporta: *Creación de un arroz resistente a las enfermedades*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; Glenn Zorpette
Marguerite Holloway y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
PUBLISHER Joachim P. Rosler
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.000	20.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

UN NUEVO SCIENTIFIC AMERICAN. «Con nuevos propietarios y un nuevo consejo de redacción, nuestro viejo *Scientific American* se convierte, a sus 103 años de existencia, en una revista general de la ciencia. Se ocupa de física, biología, sociología, de todas las ciencias y de sus principales aplicaciones en los campos de la medicina y la ingeniería.»

PROSPECCIONES DESDE AVIÓN. «Hasta hace poco los geofísicos que investigaban el campo magnético terrestre enviaban equipos de reconocimiento provistos de magnetómetros. A menudo, para recoger información, esos equipos debían abrirse paso a machetazos por vegetaciones espesas. Era un trabajo lento y caro. Hoy los geofísicos han logrado un espectacular refinamiento de su viejo método: el magnetómetro aéreo. Embarcado en un avión que vuela a 225 km/h y a una altura de hasta 450 m, el magnetómetro aéreo puede facilitar datos exactos sobre nuevos recursos petrolíferos y minerales a razón de hasta casi 2.600.000 ha mensuales.»

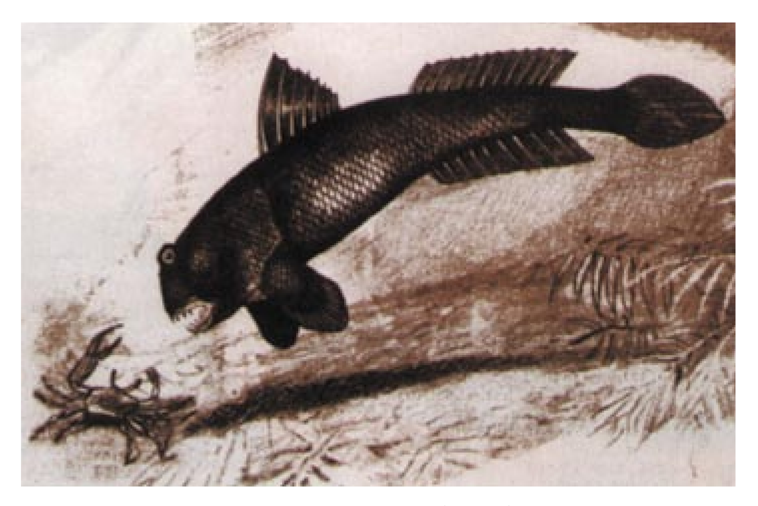
...cien años

LA OBSESIÓN DE EDISON. «El notable proceso de trituración y separación magnética de las menas de hierro en los talleres del señor Thomas Edison, en New Jersey, muestra una originalidad característica libre de las trabas de la tradición. Las piedras ferríferas se introducen entre unos "rodillos gigantes" de 70 t capaces de asir un peñasco de 5 t y triturarlo con la misma facilidad con que un perro roe un hueso. Tras atravesar varios cilindros y cedazos, el material molido cae en fina película ante una serie de imanes; éstos desvían las partículas que contienen hierro. Hablamos del más reciente y radical avance en la minería y metalurgia del hierro.»

CIRUGÍA RADICAL. «El catálogo de los logros brillantes de la cirugía debe ya incluir la operación realizada por el docto Carl Schlatter, de la Universidad de Zurich, que ha extirpado el estómago de una mujer. La paciente, cuyo estado es bueno, ha sobrevivido tres meses a la operación. Anna Landis, una tejedora de sedas suiza, tiene 56 años. Sufría de dolores abdominales y un examen reveló que su estómago estaba irremediablemente enfermo a causa de un gran tumor. El doctor Schlatter concibió la atrevida idea de extirpar el estómago y unir el intestino con el esófago, formando un conducto directo desde la garganta que atravesara los intestinos. La herida abdominal sanó rápidamente y el apetito de la mujer es ahora bueno, aunque no come mucho de una sola vez.»

VERNE SUPERADO. «Cuando Julio Verne escribió su fascinante novela *La vuelta al mundo en 80 días* (1873), pretendía mostrar todo lo que podían dar de sí los medios de transporte de su tiempo. Un cuarto de siglo después nos acercamos al día en que cualquier turista pueda hacer ese viaje en menos de la mitad de ochenta días. El ministro ruso de comunicaciones ha afirmado que cuando el Gran Ferrocarril Transiberiano se haya terminado, a principios del siglo XX, la vuelta al mundo podrá efectuarse en 33 días.»

UN PEZ SALTARÍN. «Los más interesantes ejemplares de peces anfibios se encuentran entre los carnívoros de los trópicos. Nuestra ilustración muestra un "saltafango" del género *Periophthalmus*. La cabeza de este pez es grande; sus ojos, llamativos y saltones. Con unas potentes aletas pectorales, que más parecen patas, brinca por orillas arenosas o fangosas. Cuando son perseguidos preparan la huida refugiándose en tierra antes que en el agua.»



En tierra, un extraño pez salta sobre su presa

...ciento cincuenta años

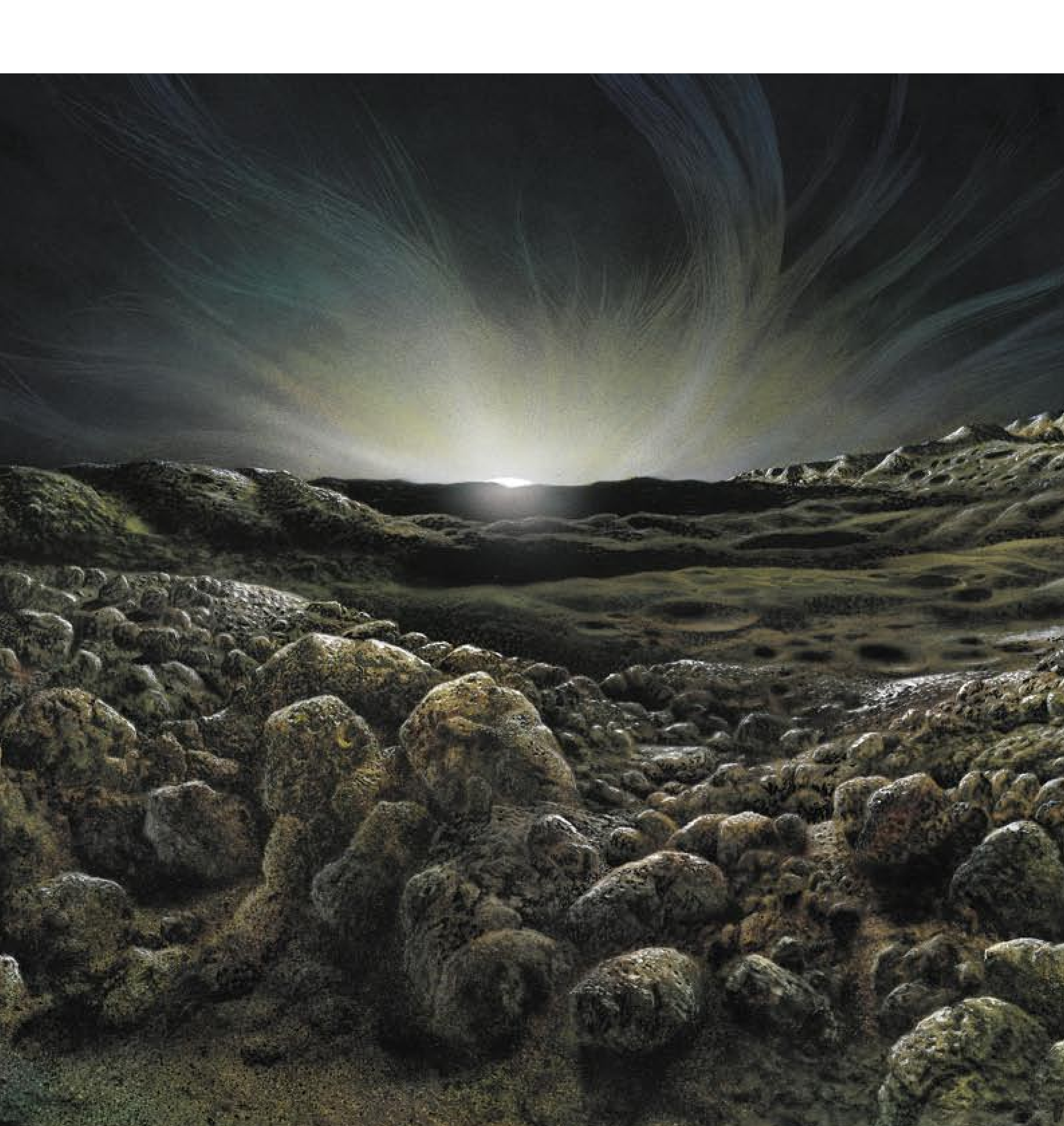
COMERCIO DE OPIO. «Un comité de la Cámara de los Comunes británica informa que el valor total de las importaciones chinas se eleva a 43.296.782 dólares, cifra de la que veintitrés millones se pagan por opio. En otros países, Siam, Indostán, etc., se consumen también grandes cantidades. Sus horrendos efectos se manifiestan en unas mejillas cetrinas y hundidas, unos ojos vidriosos y acuosos, un aspecto imbécil y una mirada ida, con todas las repugnantes ruinas que el vicio puede causar en el cuerpo y alma humanos.»

COMPROBACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ. «Una observación cuidadosa de los eclipses de los satélites de Júpiter ha permitido deducir una regla capaz de predecir los instantes en que las lunas se deslizan en la sombra del planeta y desaparecen, para reaparecer luego. Se descubrió que esas reapariciones tenían lugar dieciséis minutos y medio antes cuando Júpiter se encontraba en el mismo costado del Sol que la Tierra, que cuando se hallaba en el otro costado. O sea, antes según un diámetro de la órbita terrestre, lo que demuestra que la luz solar tarda en llegarnos ocho minutos y cuarto.»

Mercurio: el planeta olvidado

Pese a ser uno de los vecinos que la Tierra tiene más cerca, ese mundo extraño persiste en muy buena medida desconocido

Robert M. Nelson



Mercurio, el planeta más cercano al Sol, es un mundo donde reinan los extremos. De todos los objetos que se condensaron a partir de la nebulosa presolar, es el que se formó a mayores temperaturas. Del amanecer al crepúsculo, un día dura allá 176 terrestres; es el día más largo de todo el sistema solar, más incluso que su propio ciclo anual. Cuando Mercurio está en el perihelio (el punto de la órbita más cercano al Sol) se desplaza con tal rapidez, que si nos situásemos en algún punto de su superficie nos parecería que el Sol se detenía en el cielo y retrocedía, y así hasta que la rotación del planeta dominara otra vez y el Sol avanzase de nuevo. Durante el día la temperatura de la superficie alcanza los 700 grados kelvin, la mayor del sistema solar (más que suficiente para derretir el plomo); de noche cae hasta sólo 100 grados kelvin (como para congelar el criptón).

Tales particularidades convierten a Mercurio en un objeto muy intrigante.

ROBERT M. NELSON es, desde 1979, investigador del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, California. Estuvo adscrito al fotopolarímetro del *Voyager* y forma parte del equipo de investigación del espectrómetro para la cartografía visual e infrarroja de la misión *Cassini* a Saturno.

Plantea grandes problemas a la investigación científica. Sus propiedades extremas hacen que cueste encajarlo en un esquema general de evolución del sistema solar, pero esas mismas singularidades ofrecen una oportunidad sensible y exigente de comprobar las teorías de los astrónomos. Y sin embargo, aunque Mercurio es, después de Marte y Venus, el vecino más próximo a la Tierra, sólo del remoto Plutón sabemos menos. Siguen envueltos en el misterio los orígenes y evolución de Mercurio, su especial campo magnético, su tenue atmósfera, su núcleo, quizá líquido, su densidad altísima.

El planeta brilla mucho, pero está tan lejos que los astrónomos de antaño no lograban distinguir las peculiaridades de su superficie; tuvieron que conformarse con determinar su movimiento en el cielo. Tal como lo vemos desde la Tierra, Mercurio, por ser el planeta más interior del sistema solar, nunca se aleja del Sol más de 27 grados. Este ángulo es menor que el de las manecillas de un reloj a la una. Por tanto, sólo se puede observarlo de día (aunque la luz solar dispersa dificulta su observación), poco antes del amanecer o poco después del ocaso, cuando el Sol se sitúa justo encima del horizonte. Pero al alba o en el crepúsculo la posición celeste de Mercurio es demasiado baja y su luz debe atravesar diez veces más aire turbulento que cuando se encuentra en el cenit del observador. Los mejores telescopios terrestres sólo distinguen los rasgos de Mercurio que cubren una extensión de al menos varios cientos de kilómetros de diámetro, una resolución mucho peor que cuando se mira la Luna a simple vista.

Pese a tales limitaciones, la observación terrestre ha proporcionado resultados interesantes. En 1955 se hizo que rebotaran ondas de radar en la superficie de Mercurio. Al medir el corrimiento Doppler de la frecuencia de las ondas reflejadas se supo que el período de rotación del planeta era de 59 días. Hasta entonces se aceptaba



1. EL AMANECER EN MERCURIO, de un brillo diez veces mayor que en la Tierra, viene anunciado por fulguraciones procedentes de la corona solar que serpentean sobre el horizonte e iluminan en esta ilustración (basada en los datos del *Mariner* 10) las laderas del escarpe *Discovery* (*a la derecha de la imagen*). Se ven en el cielo un planeta azul y su luna.

comúnmente que era de 88 días, como su período anual; se creía, pues, que una de las caras siempre miraba al Sol. Lo sorprendente es la sencilla relación 2:3 entre el día y el año de Mercurio. Es probable que una flexión de marea disipara energía y frenase la rotación, en un principio mucho más rápida, del planeta; algún proceso enigmático debió de encerrarla en esa relación 2:3.

A los nuevos observatorios espaciales, como el Telescopio Espacial Hubble, no les limita la distorsión atmosférica; cabría pensar, por tanto, que son las herramientas ideales para el estudio de Mercurio. Por desgracia el Hubble —como muchos otros sensores espaciales— no puede apuntar hacia Mercurio porque los rayos solares, tan cercanos al planeta, podrían dañar los sensibles instrumentos ópticos instalados a bordo.

Parece, pues, que la única forma de investigar Mercurio es por medio de una nave espacial que lo examine de cerca. Sólo una vez ha llegado hasta él una sonda, el *Mariner* 10, que, integrado en una misión más amplia de exploración del sistema solar interior, lo sobrevoló en los años setenta. Conseguir que la sonda llegara allá no fue tarea fácil. Caer directamente en el pozo de potencial gravitatorio del Sol era imposible; tuvo que rebotar en el campo de Venus para perder así energía gravitatoria y frenarse, como requería su encuentro con Mercurio. La órbita que describía el *Mariner* alrededor del Sol hizo que se acercara tres veces a Mercurio: el 29 de marzo de 1974, el 21 de septiembre de 1974 y el 16 de marzo de 1975. La nave recogió imágenes de aproximadamente un 40 por ciento de la superficie de Mercurio; en ellas se descubría un terreno cubierto de cráteres que, a primera vista, se asemejaba a la faz de la Luna.

Lamentablemente las imágenes dieron pie a la errónea impresión de que Mercurio era más o menos como la Luna, sólo que en una región diferente del sistema solar. Por eso ha sido el planeta olvidado del programa espacial estadounidense. Se han llevado a cabo más de cuarenta misiones a la Luna, veinte a Venus y más de quince a Marte. Para finales de la próxima década habrá en órbita alrededor de Venus, Marte, Júpiter y Saturno una flota de satélites que durante muchos años enviará información minuciosa sobre estos planetas y sus inmediaciones. Pero Mercurio seguirá siendo, en gran parte, un lugar por explorar.

Debemos a la misión Mariner casi todo cuanto sabemos de Mercurio. La batería de instrumentos que la sonda llevaba a bordo envió a la Tierra unas 2000 imágenes cuya resolución efectiva era de unos 1,5 kilómetros, comparable a la de una vista de la Luna tomada desde la Tierra con un telescopio de gran diámetro. Pero todas esas imágenes captaban sólo una de las caras de Mercurio; la otra no se ha visto nunca.

Al medir la aceleración del Mariner en el sorprendentemente potente campo gravitatorio de Mercurio se confirmó una de sus características más singulares: su alta densidad. Los demás cuerpos terrestres del sistema solar, es decir, no gaseosos —Venus, la Luna, Marte y la Tierra—, exhiben una relación bastante lineal entre densidad y tamaño. La Tierra y Venus presentan una densidad elevada; menos densos son la Luna y Marte. Aunque Mercurio no sea mucho mayor que la Luna, su densidad es la típica de un planeta mucho mayor, como la Tierra.

Este dato ofrece un indicio crucial sobre el interior de Mercurio. Las capas externas de un planeta terrestre están hechas de silicatos, de materiales ligeros. A medida que se gana en profundidad aumenta la densidad debido, por una parte, a la compresión que ejercen las capas de roca superiores y, por otra, a la diferente composición de los materiales del interior. Los núcleos, muy densos, de los planetas terrestres seguramente están compuestos de hierro sobre todo.

Cabe, pues, que Mercurio tenga, en relación a su tamaño, el mayor núcleo metálico de todos los planetas terrestres. Esa tesis ha desencadenado un vigoroso debate acerca del origen y la evolución del sistema solar. Los astrónomos aceptan que todos los planetas se condensaron a partir de la nebulosa solar, más o menos al mismo tiempo. Si esta premisa es cierta, una de tres posibles circunstancias podría explicar por qué Mercurio es tan especial. En primer lugar, la composición de la nebulosa solar quizá fuese muy diferente en la vecindad de la órbita de Mercurio, mucho más de lo que predecían los modelos teóricos. O el Sol podría haber sido tan energético en los principios del sistema solar que los elementos más

Datos imprescindibles

Con una órbita muy inclinada y excéntrica, Mercurio es el planeta más interior del sistema solar. Gira sobre su propio eje a una velocidad lentísima, de modo que el día dura 176 terrestres; es más largo que su período anual de 88 días terrestres. Su proximidad al Sol y los días interminables hacen que las temperaturas diurnas sean las más elevadas del sistema solar.

Su superficie es rocosa, abundante en cráteres. Es algo mayor que la Luna y excepcionalmente denso para su tamaño; ha de tener, pues, un gran núcleo de hierro. Además posee un fuerte campo magnético, lo que sugiere que existen zonas líquidas en el núcleo. Habida cuenta de que un planeta pequeño como éste debería haberse enfriado lo suficientemente deprisa como para solidificarse del todo, estos hallazgos despiertan interrogantes sobre su origen e incluso acerca del nacimiento del sistema solar.

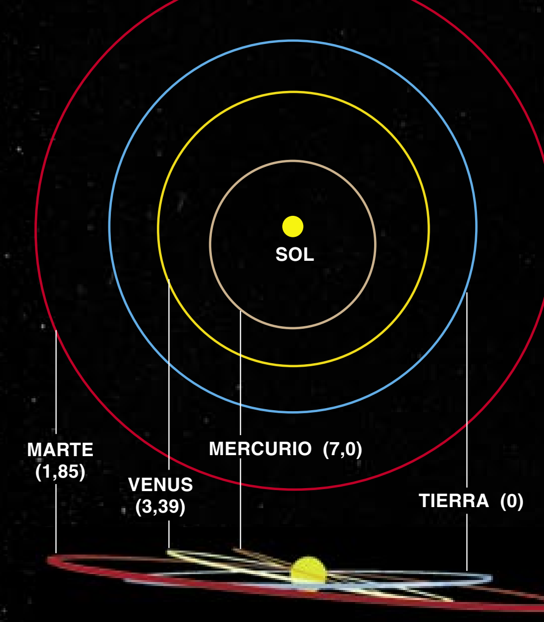
El campo magnético de Mercurio forma alrededor del planeta una magnetosfera que resguarda parcialmente la superficie del potente viento de protones que emana del Sol. La tenue atmósfera está hecha de partículas del viento solar, recicladas, o arrancadas de la superficie.

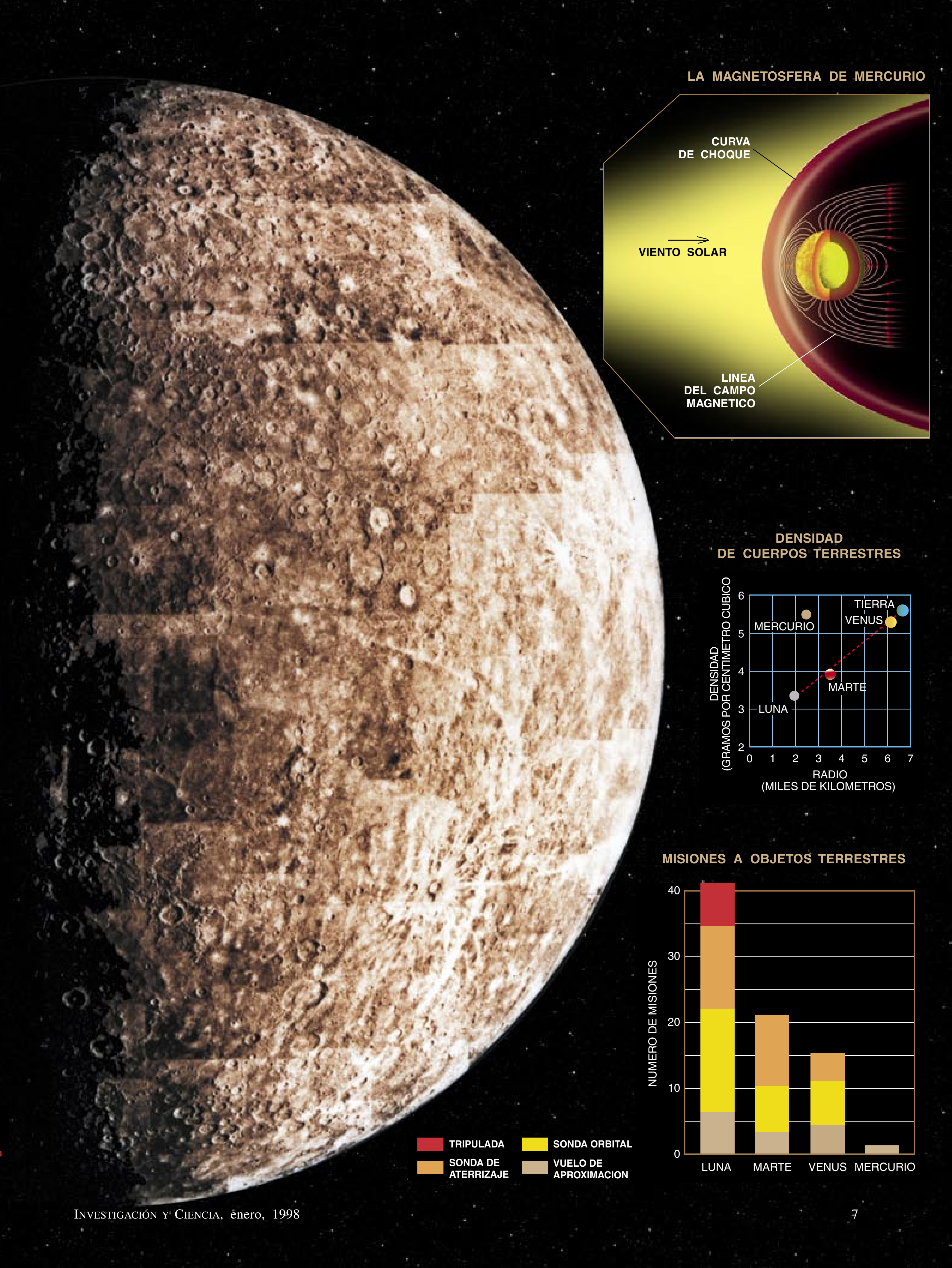
Pese a su desconcertante naturaleza, sólo una nave espacial, *Mariner* 10, ha volado hasta Mercurio. ***—R.M.N***

TAMAÑOS RELATIVOS DE LOS CUERPOS CELESTES



ORBITAS RELATIVAS DE LOS CUERPOS TERRESTRES (grado de inclinación respecto a la eclíptica)

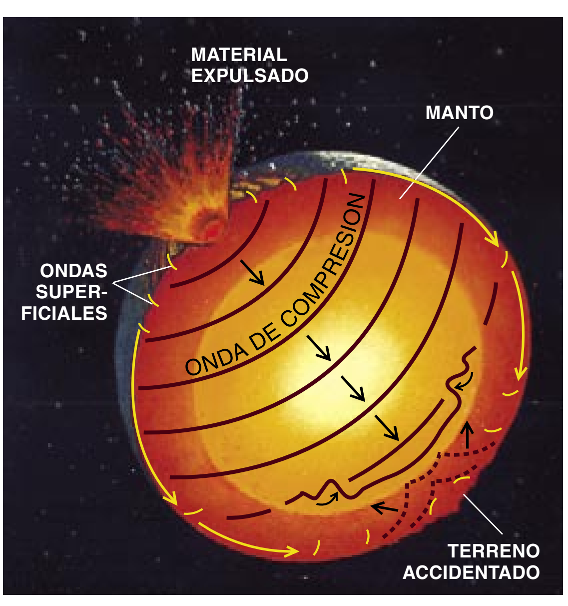



LA MAGNETOSFERA DE MERCURIO
CURVA DE CHOQUE
VIENTO SOLAR
LINEA DEL CAMPO MAGNETICO
DENSIDAD DE CUERPOS TERRESTRES
DENSIDAD (GRAMOS POR CENTIMETRO CUBICO)
RADIO (MILES DE KILOMETROS)
MERCURIO
TIERRA
VENUS
MARTE
LUNA
MISIONES A OBJETOS TERRESTRES
NUMERO DE MISIONES
LUNA
MARTE
VENUS
MERCURIO
TRIPULADA
SONDA ORBITAL
SONDA DE ATERRIZAJE
VUELO DE APROXIMACION

volátiles y de menor densidad del planeta se vaporizasen y dispersasen. O, tercera posibilidad, un objeto de masa elevada podría haber colisionado con Mercurio poco después de su formación y haber vaporizado los materiales de menor densidad. Pero con las pruebas acumuladas hasta ahora no se puede optar por una de estas explicaciones.

Por extraño que parezca, el análisis cuidadoso de los hallazgos del Mariner, unido a las laboriosas observaciones espectroscópicas realizadas desde la Tierra, no ha logrado detectar ni siquiera ínfimas cantidades de hierro en las rocas de la corteza de Mercurio. Esta ausencia de hierro en su superficie contrasta con la abundancia que se cree existe en el interior. Hay hierro en la corteza de la Tierra y la espectroscopía lo ha detectado también en las rocas de la Luna y Marte. Por tanto, Mercurio podría ser el único planeta del sistema solar interior cuyo denso hierro se concentre en el interior mientras en la corteza se acumulan sólo los livianos silicatos. Puede que permaneciera fundido tanto tiempo, que las sustancias pesadas se asentasen en su centro lo mismo que el hierro se deposita bajo la escoria en un horno de fundición.

El *Mariner* 10 también descubrió que Mercurio tiene un campo magnético bastante intenso, el más potente de los planetas terrestres, exceptuada la Tierra. El campo magnético de la Tierra está generado por los metales fundidos, conductores de la electricidad, que gracias a un proceso de "dínamo autosuficiente" circulan por su núcleo. Si la fuente del campo magnético de Mercurio es similar, es que su interior es líquido.

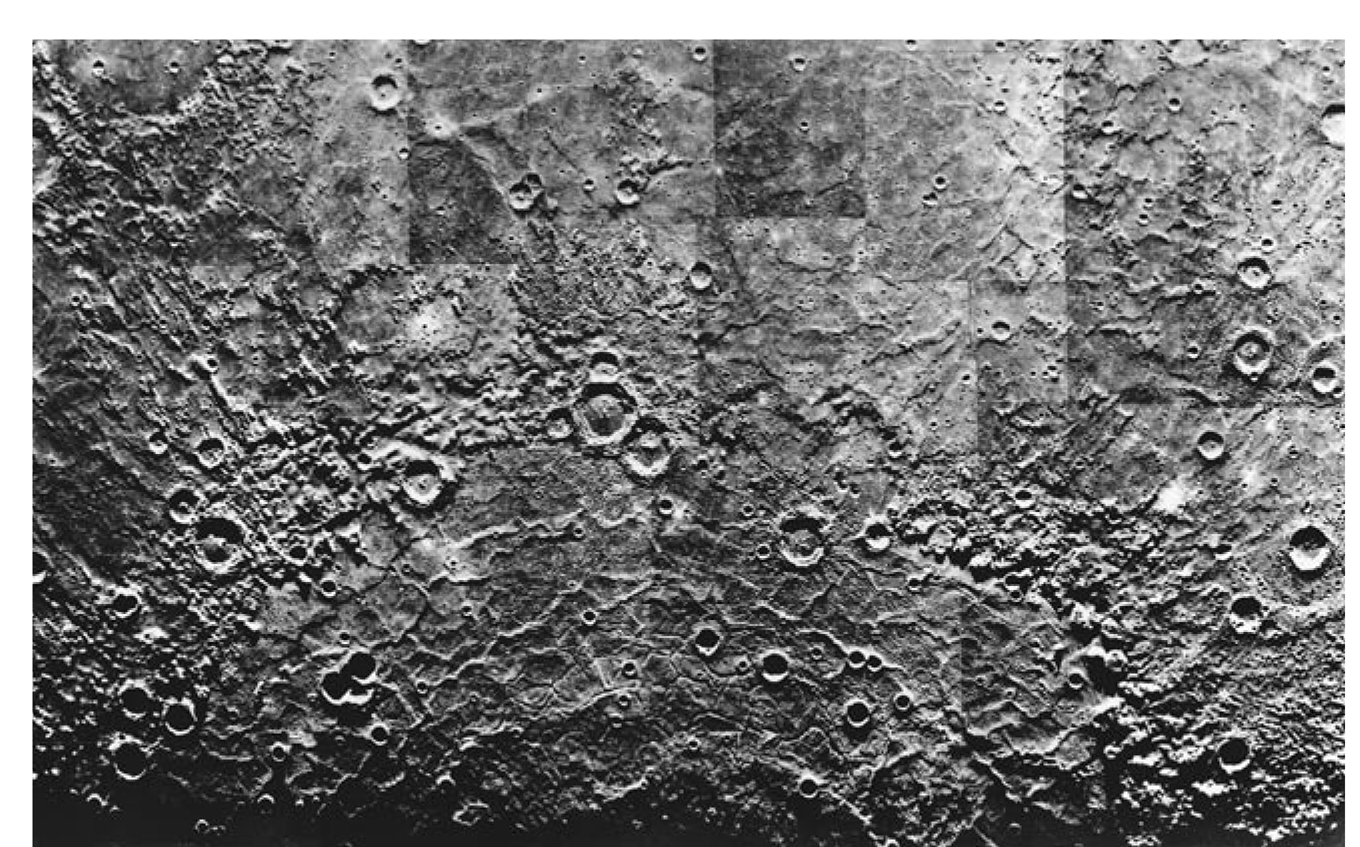


2. EL CRATER CALORIS se formó cuando un proyectil gigantesco embistió Mercurio hace 3600 millones de años (*arriba*). Las ondas de choque sacudieron el planeta y crearon terrenos abruptos y rayados en la cara opuesta. El borde de Caloris (*abajo*) es una serie de ondas concéntricas "congeladas" después del impacto. Desde entonces su base llana, de 1300 kilómetros de ancho, se ha ido cubriendo de cráteres menores.

Esta hipótesis presenta un problema. En Mercurio, un objeto pequeño, el área superficial es grande con respecto al volumen. Por tanto, si todo lo demás es igual, el cuerpo pequeño radiará energía al espacio a un ritmo mucho más rápido que un cuerpo mayor. Si el núcleo de Mercurio, tal como indican el fuerte campo magnético y la elevada densidad, fuese de puro hierro, se habría enfriado y solidificado hace eones. Pero un núcleo sólido no es capaz de dar vida a una dínamo magnética autosuficiente.

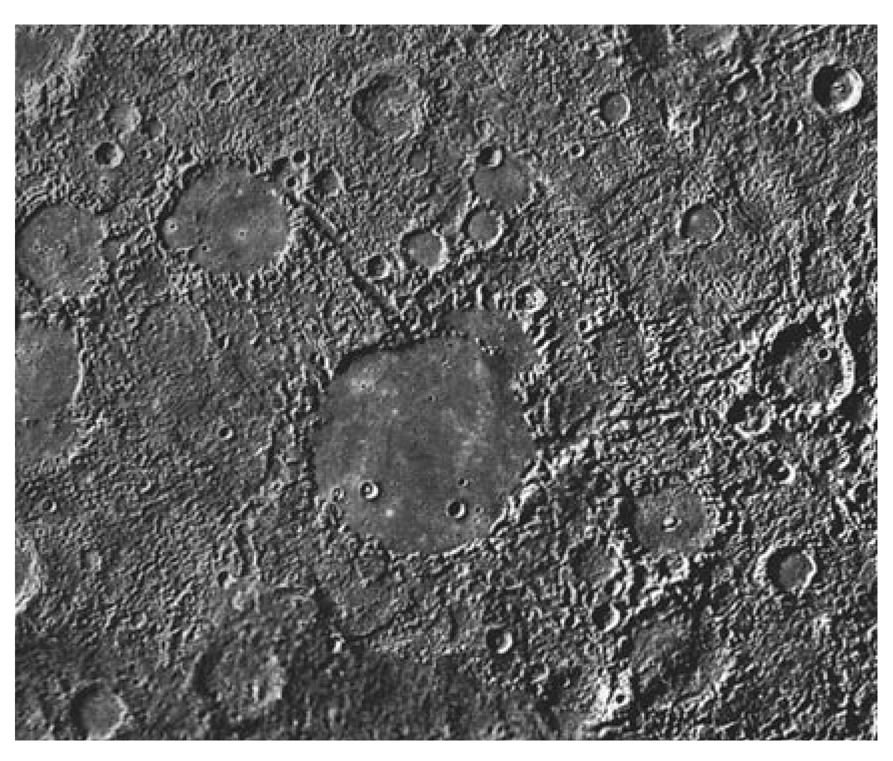
Esta contradicción sugiere que existen otros materiales en el núcleo. Tales aditivos podrían disminuir el punto de congelación del hierro de modo que permaneciese líquido incluso a temperaturas bastante bajas. El azufre, un elemento abundante en el cosmos, es un posible candidato. En los modelos de Mercurio recientes, en efecto, aunque el núcleo está compuesto de hierro sólido, lo rodea una capa líquida de hierro y azufre a una temperatura de 1300 grados kelvin. Pero esta solución de la paradoja sigue siendo una conjetura.

Cuando una superficie planetaria se ha solidificado, puede que se combe si está sometida de forma constante, durante largos períodos de tiempo, a una tensión, o que se resquebraje como lo haría un trozo de cristal cuando recibe un golpe. Poco después de su nacimiento,



hace 4000 millones de años, Mercurio sufrió el bombardeo de enormes meteoritos que penetraron en su frágil epidermis externa y liberaron ingentes torrentes de lava. En tiempos más recientes ha habido colisiones menos violentas que de todas formas han generado ríos de lava. Tales impactos tuvieron que liberar suficiente energía como para derretir la superficie o hacer que brotasen capas líquidas más profundas. La superficie de Mercurio está marcada por fenómenos que ocurrieron después de que su capa externa se solidificara.

Los geólogos planetarios han esbozado la historia de Mercurio basándose en esas huellas, pese a que no se dispone de conocimientos precisos acerca de las rocas que forman su corteza. El único modo de determinar una edad absoluta es mediante la datación radiométrica de muestras extraídas del planeta (de las que tampoco se dispone hasta la fecha). Pero los geólogos tienen maneras ingeniosas de asignar edades relativas, en su mayor parte basadas en el principio de superposición: una formación que esté superpuesta o corte a otra es menos antigua que ésta. Dicho principio resulta particularmente útil para establecer las edades relativas de los cráteres.



3. LOS ANTIPODAS DE CALORIS son unos terrenos caóticos, con colinas y fracturas generadas por el impacto en el lado opuesto del planeta. El cráter Petrarca (*centro*) lo abrió un impacto mucho más reciente, como evidencia la escasez de cráteres secundarios en su lecho liso. Pero fue lo bastante violento como para fundir las rocas, que fluyeron por un canal de cien kilómetros de longitud y anegaron un cráter cercano.

Mercurio presenta varios cráteres grandes, rodeados por múltiples anillos concéntricos de colinas y valles que probablemente se originaron tras el impacto de un meteorito: sus ondas de choque se propagarían —como al lanzar una piedra a un estanque— desde el lugar del impacto hasta que se quedaron "congeladas". Caloris, un monstruo de 1300 kilómetros de diámetro, es el mayor de estos cráteres. El impacto que lo creó formó una cuenca llana —donde lo dejó todo como la palma de la mano— sobre la que nuevos impactos más pequeños han ido marcando su huella. Dada una estimación del número de proyectiles que colisionan con el planeta por unidad de tiempo, la distribución de tamaños de estos cráteres indica que el impacto de Caloris seguramente ocurrió hace unos 3600 millones de años; este dato nos sirve como punto de referencia temporal. La colisión fue tan violenta, que rajó la superficie del extremo opuesto del planeta: en los antípodas de Caloris hay numerosas grietas y fallas.

La superficie de Mercurio está cruzada también por formaciones rectilíneas de origen desconocido, orientadas principalmente de norte a sur, nordeste a sudoeste y noroeste a sudeste; dibujan la "red mercuriana". Una explicación de su existencia sería que la corteza se solidificara cuando la rotación del planeta era mucho más rápida, quizá con un día de sólo veinte horas. Con estas vueltas tan veloces el planeta tendría un bulbo ecuatorial; al ralentizarse hasta alcanzar su período actual la gravedad le conferiría una forma más esférica. Es probable que las líneas surgiesen cuando la superficie se acomodara a este cambio: no cruzan el cráter Caloris, lo que indica que son anteriores al impacto que lo creó.

Mercurio, mientras se frenaba su rotación, además se enfriaba, y se solidificaban por tanto las regiones externas de su núcleo. La contracción que acompañó a estos fenómenos seguramente redujo el área superficial del planeta en alrededor de un millón de kilómetros cuadrados, con lo que se generaría una red de fallas que se manifestaría en forma de los largos escarpes curvos que surcan la superficie.

En comparación con la Tierra, donde la erosión ha alisado la mayoría de los cráteres, las superficies de Mercurio, Marte y la Luna muestran nítida su frecuente incidencia. La distribución de tamaños es similar en los tres, con la salvedad de que en Mercurio tienden a ser algo mayores. Los objetos que se precipitaron sobre Mercurio viajaban casi con toda seguridad a velocidades superiores que los que chocaron contra los otros planetas. Es lo que cabe esperar si los proyectiles describen órbitas elípticas alrededor del Sol, porque en la región de la órbita de Mercurio se mueven más deprisa que en zonas más alejadas. Por tanto, esos cuerpos rocosos debían de provenir de una misma familia, originada en el cinturón de asteroides. Las lunas de Júpiter presentan, por contra, una distribución diferente de tamaños de cráteres, lo que indica que chocaban con un grupo distinto de objetos.

El campo magnético de Mercurio es lo bastante intenso para atrapar las partículas cargadas que arrastra el viento solar (un torrente de protones liberado por el Sol). El campo magnético forma una pantalla, o magnetosfera, una versión en miniatura de la que rodea a la Tierra. Las magnetosferas cambian sin cesar en respuesta a la actividad solar; al ser

más pequeña, la pantalla magnética de Mercurio cambia mucho más deprisa que la de la Tierra y reacciona con rapidez al viento solar, cuya densidad en Mercurio decuplica la registrada en la Tierra.

El viento solar bombardea implacable el lado iluminado de Mercurio. El campo magnético es justo lo bastante potente como para impedir que el viento llegue a la superficie del planeta, salvo cuando la actividad del Sol es más intensa o cuando Mercurio está en el perihelio. En esos casos, los protones de gran energía que componen el viento solar arrancan materia de la costra del planeta y la magnetosfera puede atrapar las partículas así liberadas.

Pero un cuerpo tan caliente como Mercurio no retiene una atmósfera considerable, ya que las moléculas de gas se desplazan por lo normal a mayor velocidad que la de escape del planeta. Cualquier cantidad significativa de material volátil que haya en Mercurio no tardará en disiparse hacia el espacio, y ésta es la razón por la que, durante largo tiempo, la opinión generalizada fue que el planeta carecía de atmósfera. Sin embargo, el espectrómetro de ultravioletas instalado en el *Mariner* 10 detectó hidrógeno, helio y oxígeno. Observaciones realizadas posteriormente desde la Tierra hallaron restos de sodio y potasio.

No se ha acallado el debate sobre la fuente y el destino final de este material atmosférico. En contraste con la capa gaseosa que recubre la Tierra, la atmósfera de Mercurio se evapora y regenera constantemente. Es probable que en gran parte sea creada, directa o indirectamente, por el viento solar; algunos de los componentes podrían provenir de la magnetosfera o del flujo de material cometario: una vez que un átomo es arrancado de la superficie por la acción del viento solar puede incorporarse a la tenue atmósfera del planeta. Es incluso posible que éste continúe deshaciéndose de los últimos restos de su repertorio inicial de sustancias volátiles.

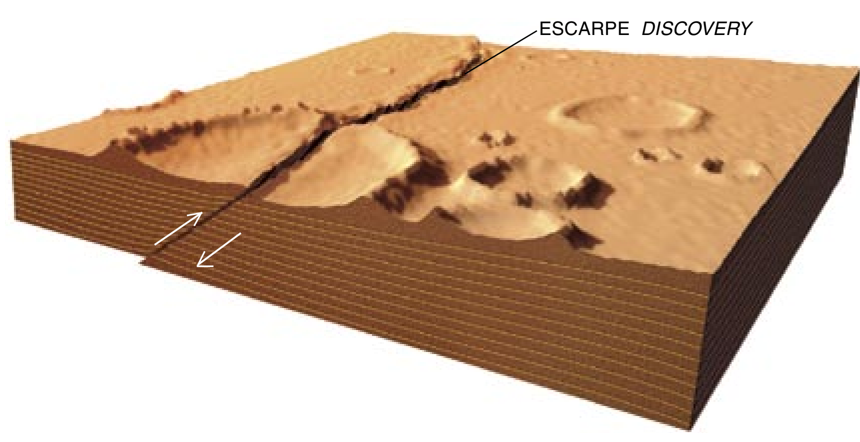
Recientemente un equipo de astrónomos del Instituto de Tecnología de California y del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL), ambos en Pasadena, observaron la polarización circular de un haz de radar reflejado en una zona cercana a los polos de Mercurio, lo que apunta a la presencia de hielo. No deja de ser intrigante la posibilidad de que un planeta tan caliente como Mercurio muestre capas de hielo de agua (o agua sencillamente). Pudiera ser que el hielo subsista en regiones siempre sombrías cerca de los polos, como remanente del agua primordial que se condensó sobre el planeta en su nacimiento.

De ser cierto esto, Mercurio tendría que haber permanecido en una orientación muy estable desde que existe el sistema solar, sin que ninguno de los polos se hubiera inclinado en dirección al Sol, pese a fenómenos devastadores como el impacto de Caloris. Tal estabilidad sería más que notable. Otra posible fuente de agua residiría en los cometas que se precipitan sin cesar sobre el planeta. El hielo que cayese sobre los polos podría quedar a la sombra y se evaporaría muy despacio; estos depósitos de agua podrían ser una de las fuentes del oxígeno e hidrógeno que detectamos en la atmósfera de Mercurio. Por otra parte, astrónomos de la Universidad de Arizona han sugerido que las regiones polares en sombra podrían contener otra especie volátil, el azufre, que imita la reflectividad de radar del hielo pero tiene un punto de fusión superior.

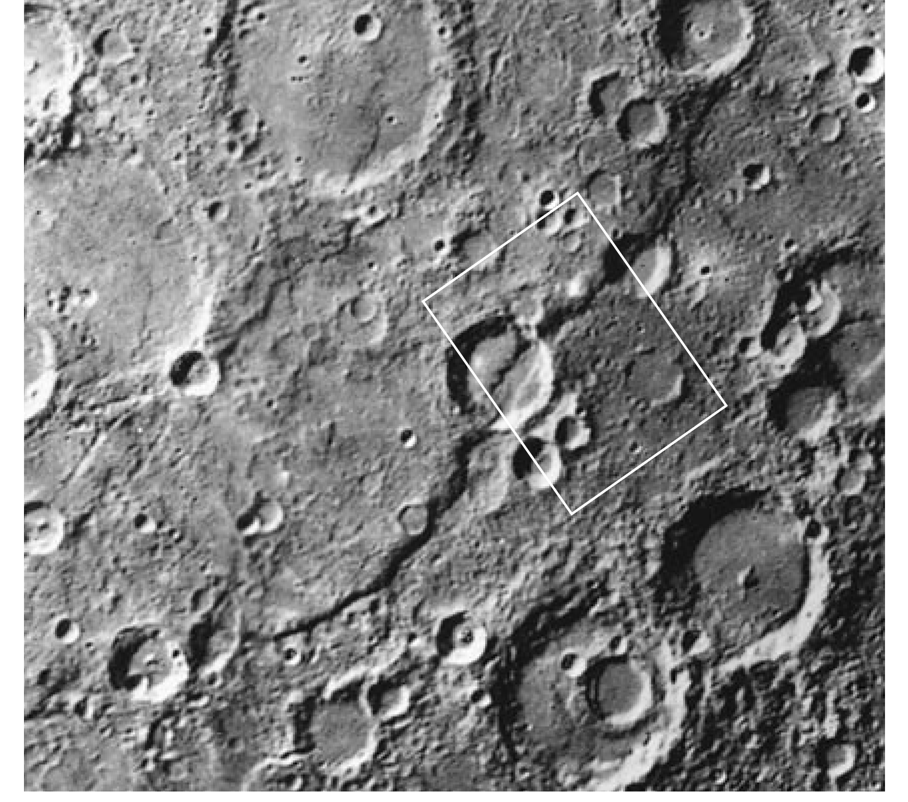
¿Por qué es Mercurio el gran ausente en los esfuerzos de un cuarto de siglo por explorar el sistema solar? Una posible respuesta es la similitud existente entre las superficies de Mercurio y la Luna. Otro factor, más sutil, se esconde en el modo en que se planean las misiones planetarias. Los miembros de los paneles de expertos de la NASA se hallaban involucrados en las misiones más recientes, y casi todas han tenido como objetivo los otros planetas, de forma que los conocimientos e intereses de esos científicos se centran en ellos: muchos defienden los planetas favorecidos. Mercurio, en cambio, cuenta con pocos abogados.

Y está la economía. Los jerarcas de la NASA exigen que los científicos propongan misiones "mejores, más rápidas y más baratas", con un conjunto limitado de objetivos, y que transijan en perder un poco de valor científico a cambio de un menor coste total. En un ambiente como el actual de recortes presupuestarios, las propuestas más ambiciosas de exploración del espacio profundo que la NASA puede tener en cuenta son las del programa *Discovery*. Para proponer tal o cual misión los científicos interesados han de asociarse a empresas, y a veces esos proyectos conjuntos son seleccionados y financiados por la NASA. Hasta el momento se han llevado a cabo cuatro misiones de estas características. Se supone que el coste de una misión para el programa *Discovery* no ha de superar los 226 millones de dólares. Como contrapunto, las misiones de la NASA *Galileo*, a Júpiter, y *Cassini*, a Saturno, costarán ambas más de mil millones de dólares.

Poner un satélite en órbita alrededor de Mercurio plantea una dificultad técnica especial. La nave tendría que estar protegida contra la intensa energía que radia el Sol e incluso contra la energía solar que se refleja en la superficie de Mercurio. Puesto que



4. EL ESCARPE DISCOVERY
(*el surco que se observa en el dibujo de arriba y en la foto de la página siguiente*) mide 500 kilómetros de largo y en algunos lugares alcanza una altitud de dos kilómetros. La superficie de Mercurio está plagada de fallas inversas como ésta, que seguramente se originaron cuando ciertas zonas del núcleo de Mercurio se solidificaron y encogieron. Como consecuencia la corteza tuvo que contraerse para adaptarse a una superficie más reducida. La compresión se produce mediante el deslizamiento de una sección de la corteza sobre otra: se genera así una falla inversa.



la sonda estaría cerca del planeta, en ocasiones la luz “mercuriana” supondría una mayor amenaza que la luz solar directa. La NASA recibió en 1994 una propuesta de misión a Mercurio dentro del programa *Discovery*, y dos en 1996.

La propuesta de 1994, o Hermes 94, utilizaba un sistema de propulsión tradicional, de hidracina-tetróxido de nitrógeno, que requería una carga de combustible de 1145 kilogramos, destinada en su mayor parte a reducir la velocidad de la nave a medida que se fuera aproximando al Sol. Los ingenieros del proyecto, entre los que me encontraba, sólo podrían haber reducido la cantidad de combustible aumentando el número de encuentros planetarios (que irían restando energía gravitatoria). Por desgracia tales maniobras habrían incrementado el tiempo de permanencia de la nave en el espacio, donde la exposición a las radiaciones reduce la vida de ciertos componentes de estado sólido imprescindibles.

El instrumental habría permitido el cartografiado de la totalidad de la superficie de Mercurio con una resolución de un kilómetro, si no mejor. Estos mapas topográficos podrían haberse correlacionado con las cartas de los campos magnético y gravitatorio de Mercurio. La NASA, aunque en un principio admitió a trámite la misión para un estudio más detallado, terminó por rechazarla debido a su elevado presupuesto y alto riesgo.

En 1996 el equipo del Hermes, el JPL y la empresa *Spectrum Astro*, de Gilbert (Arizona), propusieron una técnica novedosa que permitiría llevar la misma carga útil con una reducción drástica de la cantidad de combustible, el coste y la duración de la navegación interplanetaria. Se trataba de un propulsor iónico movido por energía solar que requeriría tan sólo 295 kilogramos de combustible. Este revolucionario motor impulsaría la nave sirviéndose de la energía solar para ionizar átomos de xenón y acelerarlos hasta velocidades elevadas mediante un campo eléctrico apuntado hacia el exterior por la parte trasera de la nave. Con esta innovación el viaje interplanetario de Hermes 96 habría durado un año menos que el de Hermes 94. Sin embargo, la NASA no recomendó el estudio detallado de Hermes 96 porque, en opinión de sus expertos, la propulsión eléctrica solar, sin el respaldo de un dispositivo químico de emergencia, era fiar demasiado en la fortuna.

No obstante, la NASA seleccionó para su estudio a fondo, dentro del ciclo de misiones *Discovery* de 1996, una propuesta —el proyecto *Messenger*— para poner en órbita alrededor de Mercurio una nave. Lo elaboró un grupo de ingenieros del Laboratorio de Física Aplicada de Maryland. Al igual que Hermes 94, se basa en la propulsión química tradicional y prevé un equipo similar de sensores, pero se añaden dos dispositivos capaces de determinar las proporciones de los elementos más abundantes en las rocas de la corteza. Pese al interés científico que revisten ambos instrumentos, su masa adicional obliga a la nave a aproximarse a Venus dos veces y tres a Mercurio antes de entrar en la órbita de éste. Esta trayectoria hará que el viaje a Mercurio dure más de cuatro años (el doble, más o menos, de lo que tardaría Hermes 96). *Messenger* es la más costosa de las misiones *Discovery* que están sobre la mesa; su presupuesto actual gira en torno a los 211 millones de dólares.

Los responsables de asignar los contratos para las misiones *Discovery* hacen hincapié en el hecho de que su criterio se basa en la opinión de evaluadores externos a la NASA. Al tomar decisiones estos comités se esfuerzan por llegar a un consenso, lo que les inclina a favorecer técnicas contrastadas y ser poco receptivos a las más innovadoras. Afortunadamente la NASA ha instituido aparte un programa dedicado a las ideas futuristas. En él enmarca la misión Espacio Profundo en el Nuevo Milenio I (*New Millennium Deep Space One*), cuyo propósito es llevar al espacio todas las técnicas de vanguardia propuestas hasta la fecha. En julio de 1998 Espacio Profundo I, impulsado por un motor iónico solar, comenzará un viaje de tres años al asteroide McAuliffe a Marte y al cometa West-Kohoutek-Ikamura. Espacio Profundo I quizá demuestre que la propulsión por energía eléctrica solar funciona tan bien como esperan sus promotores. Si es así, los motores solares podrían propulsar durante la primera parte del próximo siglo numerosos vuelos por el sistema solar interior, y en tal caso es indudable que valdrán para revelar los olvidados misterios de Mercurio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ATLAS OF MERCURY. Dirigido por M. E. Davies, D. E. Gault, S. E. Dwornik y R. G. Strom. NASA Scientific and Technical Information Office, Washington DC, 1978.

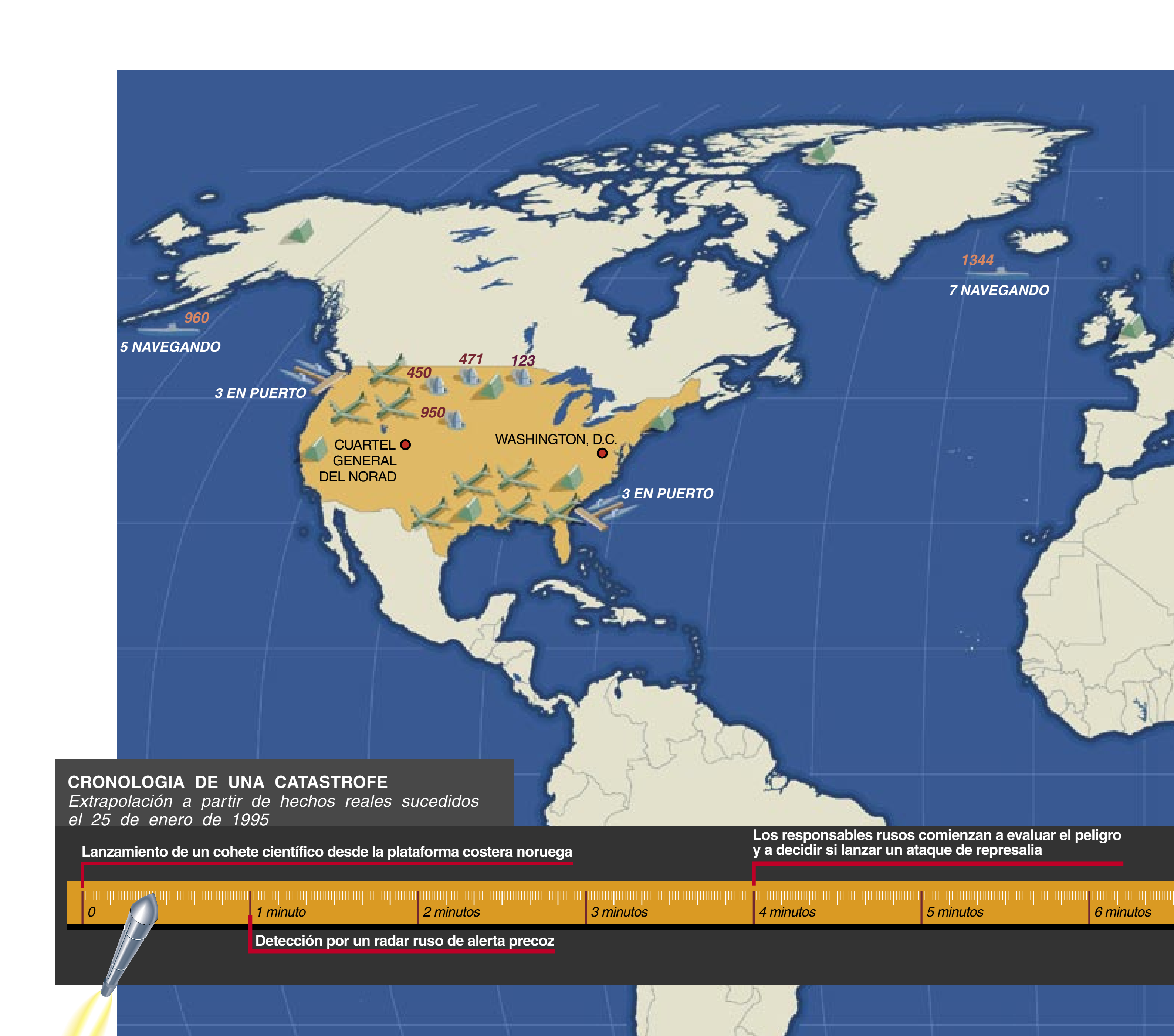
MERCURY. Dirigido por F. Vilas, C. R. Chapman y M. S. Matthews, University of Arizona Press, 1988.

THE NEW SOLAR SYSTEM. Dirigido por J. K. Beatty y A. Chaikin. Cambridge University Press y Sky Publishing Corporation, 1990.

El riesgo real de las armas nucleares

Ha llegado el momento de revocar la orden de mantener los misiles nucleares listos para su disparo. La suspensión de ese mandato reduciría la posibilidad de un lanzamiento por error

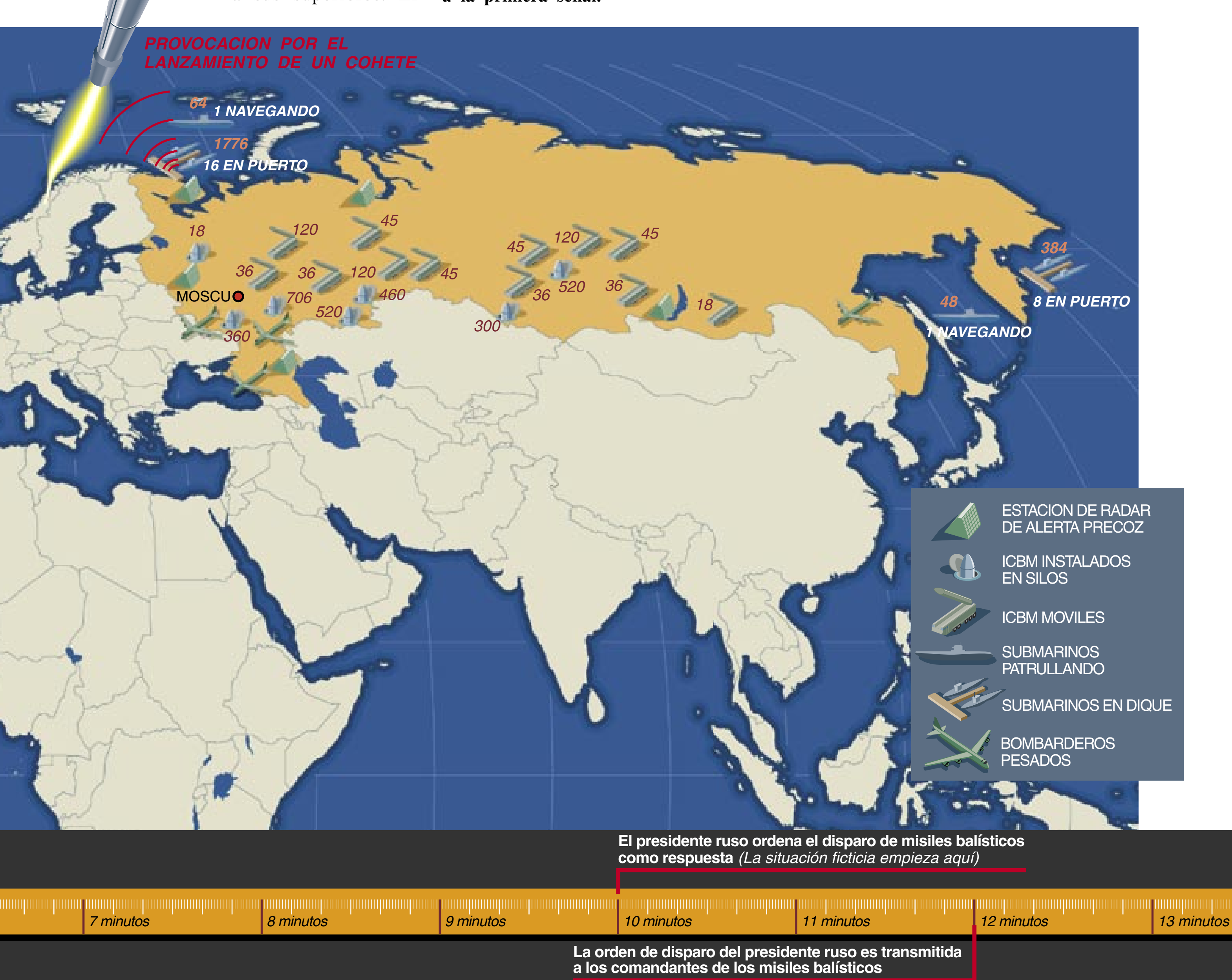
Bruce G. Blair, Harold A. Feiveson y Frank N. von Hippel



El 25 de enero de 1995, los especialistas militares de telecomunicaciones que se hallaban de servicio en diversas estaciones de radar distribuidas por el norte de Rusia observaron en sus pantallas la aparición repentina de una señal inquietante. Un cohete, lanzado desde aguas noruegas, ascendía raudo por el cielo nocturno. Perfectamente sabedores de que bastaba un solo misil procedente de un submarino norteamericano que navegase por aquel brazo de mar para arrojar hasta ocho bombas nucleares sobre Moscú en 15 minutos, los operadores de los radares alertaron de inmediato a sus superiores. El mensaje voló de la cadena de mando militar al presidente Boris Yeltsin. Este agarró la maleta electrónica que podía ordenar, en respuesta, el disparo de misiles nucleares. Sin perder un segundo consultó por teléfono con sus máximos consejeros. Por primera vez que se sepa, la "cartera nuclear" estuvo lista para intervenir.

Fueron minutos de máxima tensión, en que la trayectoria del misterioso cohete seguía siendo desconocida para los militares rusos. La ansiedad subió de tono cuando la separación de las distintas fases del cohete creó la impresión de un posible ataque con varios misiles. Atentos a la pantalla, los servidores del radar observaban la evolución de los objetos. Al cabo de unos ocho minutos (a sólo dos o tres del límite del plazo establecido para responder ante una agresión nuclear), la jefatura militar dedujo que el cohete se encaminaba mar adentro y que no planteaba amenaza alguna para Rusia.

En ese caso real, el cohete no identificado resultó ser una sonda científica



1. EL ARSENAL NUCLEAR que mantienen EE.UU. y Rusia comprende bombarderos de largo alcance, submarinos armados con misiles balísticos, misiles balísticos intercontinentales (ICBM) con base en tierra, radares y satélites de alerta precoz. Pese al final de la guerra fría, los antagonistas de antaño siguen preparados para lanzarse millares de cabezas nucleares (*cifras en el mapa*) en cuestión de minutos a la primera señal.

norteamericana lanzada para estudiar la aurora boreal. Semanas antes el gobierno noruego había informado oportunamente a las autoridades rusas acerca del lanzamiento desde la isla costera de Andoya; pero por alguna causa el preaviso del ensayo a gran altura no llegó a quien debía.

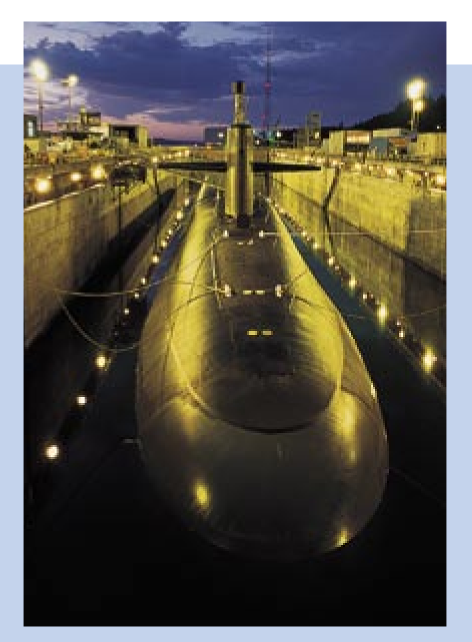
Este terrible incidente (como otras falsas alarmas que con anterioridad habían puesto en estado de respuesta inmediata a las fuerzas estratégicas norteamericanas) realza con suficiente claridad el peligro que encierra la orden de mantener los arsenales nucleares bajo el estado de alerta de disparo inmediato. Nadie puede garantizar que no se dispare un misil nuclear por fallo técnico o por error humano (error cometido, acaso, en la precipitación por responder a una falsa señal de ataque).

Hace tiempo que los militares norteamericanos y rusos implantaron procedimientos para evitar una calamidad de esa naturaleza. En Rusia, los ingenieros de los sistemas de mando han hecho grandes esfuerzos para asegurar un riguroso control central de las armas nucleares. Pero sus equipos no están exentos de fallos y los sistemas de mando nuclear se están deteriorando. En febrero de 1997, el instituto responsable del proyecto de los complejos sistemas de control de las Fuerzas de Cohetes Estratégicos (unidades militares que manejan los misiles balísticos intercontinentales) protagonizaron una huelga de protesta por los atrasos en el cobro de los sueldos y por la falta de recursos para mejorar sus instalaciones. Tres días después, el ministro de defensa, Igor Rodionov, afirmaba que "si persiste la escasez de fondos... puede que Rusia no tarde en acercarse a un umbral más allá del cual sus sistemas nucleares y de misiles escapen al control".

La advertencia de Rodionov podría, en parte, haber sido una maniobra para reunir apoyos políticos favorables a un incremento de la partida de defensa en los presupuestos. Pero los informes recientes de la CIA confirman que las Fuerzas de Cohetes Estratégicos de Rusia atraviesan unos momentos difíciles. Con reiterada frecuencia, los directores de las centrales eléctricas locales cortan el suministro de las instalaciones de armas nucleares porque las autoridades militares del lugar no pagan las facturas. Y aún peor, los equipos que controlan las armas nucleares a menudo funcionan mal; hay sistemas electrónicos e informáticos críticos que a veces cambian a modo de combate sin motivo claro. En siete ocasiones durante el otoño de 1996, el funcionamiento de algunas bases de armas nucleares sufrió graves daños cuando los ladrones intentaron beneficiar el cobre... de los cables de comunicaciones.

Muchos de los radares construidos por la antigua Unión Soviética para detectar ataques de misiles balísticos han dejado de funcionar. Difícilmente puede, pues, confiarse en la información facilitada por esas instalaciones. Incluso las maletas nucleares que acompañan al presidente, al ministro de defensa y al Jefe del Estado Mayor se están degradando. En resumen, se están desmoronando los sistemas establecidos para controlar las armas nucleares rusas.

Además de esas numerosas dificultades técnicas, las fuerzas nucleares



LOS SUBMARINOS norteamericanos como éste con misiles balísticos transportan 24 misiles de ojivas múltiples.

Misiles en submarinos

Para llegar a los límites estipulados en el START II, EE.UU. se apresta a eliminar cuatro de sus 18 submarinos de misiles balísticos y reducir de ocho a cinco el número de cabezas alojadas en los misiles de lanzamiento desde submarinos. Más adelante, para cubrir las metas del START III, EE.UU. habrá de prescindir de cuatro submarinos más y dejar en cuatro el número de ojivas por misil. Son exigencias que han de satisfacerse de inmediato. A Rusia le corresponde retirar las ojivas de los submarinos que planea eliminar en cumplimiento de los START.

Sin unas medidas de verificación harto tortuosas ninguno de los bandos lograría conocer la situación de los submarinos del otro que se hallan navegando. Ello no exime de rebajar de inmediato el nivel de disponibilidad de lanzamiento. La mitad de los submarinos estadounidenses que patrullan por los océanos transitan en un estado de alerta modificada: la tripulación necesita unas 18 horas para los preparativos, entre ellos retirar las compuertas de inundación de los tubos de lanzamiento, que ponen al submarino en alerta total. La mayoría de los submarinos estadounidenses podrían viajar en alerta modificada. Su grado de disponibilidad al lanzamiento podría rebajarse aún más retirando de los misiles los sistemas de guiado, guardándolos a bordo. Los submarinos rusos carecen de esta opción, ya que sus misiles no son accesibles desde el interior del buque.

Rusia debería comprometerse a mantener fuera de alerta a sus misiles a bordo de submarinos cuando éstos se hallen en puerto. (EE.UU. no mantiene en alerta a sus submarinos cuando están en puerto.) EE.UU. puede que tenga capacidad para observar el estado de alerta de esos submarinos rusos, pero Rusia debería evidenciarlo.

—B.G.B., H.A.F. y F.N. von H.

Se lanza ICBM rusos contra los emplazamientos de las armas nucleares y puestos de mando de EE.UU.

El NORAD (Estado Mayor de la Defensa Aérea de Estados Unidos) entrega a los responsables del gobierno una evaluación inicial del ataque ruso

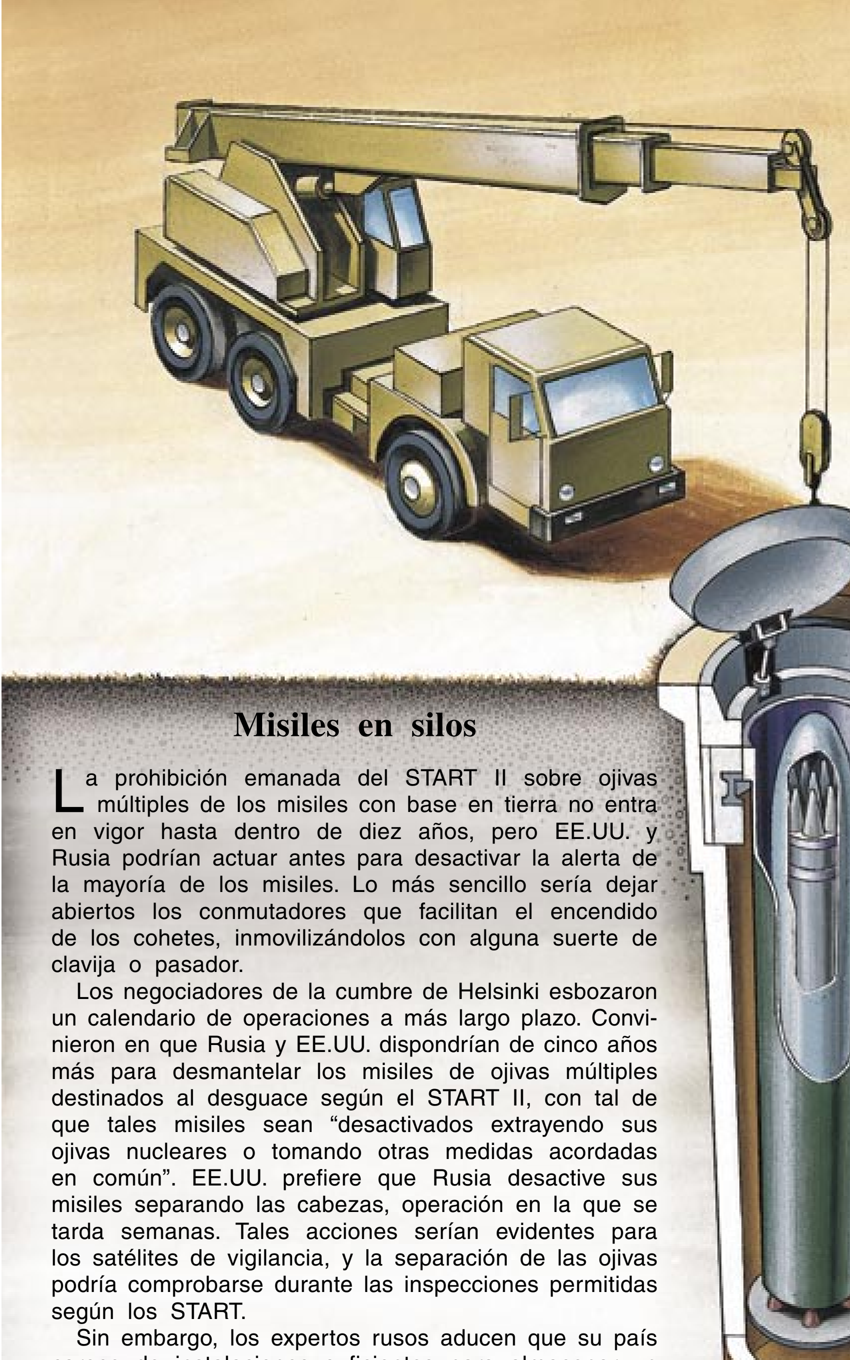
14 minutos · *15 minutos* · *16 minutos* · *17 minutos* · *18 minutos* · *19 minutos* · *20 minutos*

Los satélites de EE.UU. detectan las estelas de los cohetes de aceleración de los misiles rusos

rusas sufren un cúmulo de problemas humanos y organizativos. El personal no recibe la formación de antes y, por tanto, es menos diestro en el manejo sin peligro de las armas nucleares. Pese a las promesas de Yeltsin de mejorar las condiciones, la carestía endémica de vivienda y alimentos ha provocado la desmoralización y el descontento dentro de las Fuerzas de Cohetes Estratégicas, la flota de submarinos estratégicos y los guardianes de las reservas rusas de ojivas nucleares, los auténticos cuerpos de élite de la milicia rusa.

En consecuencia, aumenta la probabilidad de que algunos jefes de rango inferior descuiden las normas de seguridad o, peor aún, tomen sin autorización el control de armas nucleares, algo que un mando central en precario podría no ser capaz de impedir o reprimir. Aunque la mayoría del personal a cargo de los lanzamientos necesitaría los códigos especiales que guarda el Estado Mayor antes de poder disparar sus misiles, un informe reciente de la CIA advertía que algunas tripulaciones de submarinos podrían lanzar los misiles a bordo de sus buques sin necesidad previa de esa información.

Incluso en los niveles de mayor responsabilidad el control sobre las armas nucleares podría resentirse por culpa de disensiones políticas. En Rusia las relaciones entre los políticos y los jefes militares son tensas. El control material de los códigos de lanzamiento sigue en manos militares. En una situación de crisis interna, la cúpula militar podría arrogarse la decisión sobre disparar misiles balísticos. Sin ir más lejos, en el golpe de agosto de 1991 contra el presidente Mikhail S. Gorbachov, en los altos niveles mudaron de repente las lealtades y se rompió la cadena normal de mando de las armas nucleares. Durante tres días, la potestad para lanzar armas nucleares quedó en las manos del ministro de defensa Dmitri Yazov y el jefe del Estado Mayor, Mikhail Moiseyev. Habida cuenta de los momentos delicados por los que atraviesa Rusia, algo parecido podría repetirse.



2. LA TAPA de un silo ruso requeriría una grúa de gran tamaño para levantarla si se retirara adrede el sistema que genera el gas a alta presión para su bisagra neumática.

Misiles en silos

La prohibición emanada del START II sobre ojivas múltiples de los misiles con base en tierra no entra en vigor hasta dentro de diez años, pero EE.UU. y Rusia podrían actuar antes para desactivar la alerta de la mayoría de los misiles. Lo más sencillo sería dejar abiertos los conmutadores que facilitan el encendido de los cohetes, inmovilizándolos con alguna suerte de clavija o pasador.

Los negociadores de la cumbre de Helsinki esbozaron un calendario de operaciones a más largo plazo. Convinieron en que Rusia y EE.UU. dispondrían de cinco años más para desmantelar los misiles de ojivas múltiples destinados al desguace según el START II, con tal de que tales misiles sean “desactivados extrayendo sus ojivas nucleares o tomando otras medidas acordadas en común”. EE.UU. prefiere que Rusia desactive sus misiles separando las cabezas, operación en la que se tarda semanas. Tales acciones serían evidentes para los satélites de vigilancia, y la separación de las ojivas podría comprobarse durante las inspecciones permitidas según los START.

Sin embargo, los expertos rusos aducen que su país carece de instalaciones suficientes para almacenar un gran número de ojivas extraídas de misiles. Ahora están considerando otras opciones: inmovilizar las enormes tapas de los silos de modo que para abrirlas sean necesarios unos equipos muy pesados, o bien retirar las baterías que accionan los sistemas de guiado de los misiles en vuelo. Una tercera posibilidad sería sustituir los morros cónicos aerodinámicos por cubiertas de frente plano, las cuales albergarían a las ojivas pero no permitirían volar a los misiles.

—B.G.B., H.A.F. y F.N. von H.

Los radares de alerta precoz estadounidenses captan los ICBM en su vuelo; el NORAD hace una segunda evaluación

21 minutos | *22 minutos* | *23 minutos* | *24 minutos* | *25 minutos* | *26 minutos* | *27 minutos*

Aunque las relaciones internacionales han cambiado de forma radical desde el fin de la guerra fría, lo mismo Rusia que EE.UU. siguen manteniendo el grueso de sus misiles nucleares en alerta máxima. Lo que significa que no pasarían más dos o tres minutos desde la recepción de la orden de disparo sin que un arsenal de cohetes estadounidenses y rusos instalados en silos (armados, respectivamente, con unas 2000 y 3500 ojivas) iniciaran su vuelo. Cruzarían el polo Norte y alcanzarían su objetivo en 25 minutos. No habrían transcurrido 15 minutos desde la recepción de la orden cuando seis submarinos Trident, de la Armada estadounidense, arrojaran 1000 ojivas; de 300 a 400 saldrían de los submarinos rusos. En suma, ambas superpotencias nucleares siguen preparadas para arrojarse, una contra otra, más de 5000 armas nucleares en cuestión de media hora.

¿Por qué dos países en paz persisten en semejante amenaza mutua, perpetuando el peligro de un lanzamiento erróneo o no autorizado? Por la simple razón de que los militares de ambos bandos siguen obsesionados con el fantasma de un ataque deliberado por sorpresa de su antiguo adversario. Unos y otros suponen que un "primer golpe" como ése iría contra las instalaciones y silos de armas nucleares, así como contra los centros de mando que las controlan. Para impedir tal ataque, cada país se esfuerza por asegurarse una eficaz respuesta de contraataque que cubra todas las instalaciones atómicas enemigas. La respuesta echa sobre los hombros de los estados mayores una tarea par a la de preparación del ataque primero; es decir, la contundencia de la respuesta tiene que garantizar la destrucción rápida de miles de blancos esparcidos por todo un continente lejano.

Para cumplir esta exigencia, Rusia y EE.UU. dependen de una estrategia de lanzamiento-ante-alerta; esto es, cada bando está preparado para descargar una salva masiva de misiles en represalia, pero antes de la arribada de las ojivas atacantes (que podrían tardar sólo 15 minutos si las disparasen submarinos navegando cerca). Aunque posee miles de ojivas desplegadas y a salvo en el mar, EE.UU. adopta esta postura de reacción rápida a causa de la vulnerabilidad de sus silos de misiles y sistemas de mando, Casa Blanca y Pentágono incluidos.

Para los responsables rusos, el lanzamiento ante alerta constituye una necesidad más apremiante incluso. Es normal que el Estado Mayor tema que, si sus misiles nucleares no se lanzan al instante, sólo quedarían unas decenas en condiciones de responder tras recibir un ataque global de EE.UU. Ante un asalto en bloque, los puestos de mando y los silos de misiles rusos resultan tan vulnerables como los de EE.UU.

La actual incapacidad de Rusia para desplegar buena parte de sus fuerzas que mejor sobrevivirían a un ataque (los submarinos en navegación y los misiles móviles en tierra) aumenta su desasosiego. La falta de recursos y de personal cualificado ha forzado a la armada rusa a reducir considerablemente las operaciones. La marina mantiene navegando en patrulla de combate sólo dos de sus 26 submarinos armados de misiles balísticos. Por restricciones similares limita a uno o dos los regimientos de misiles móviles montados en camiones que se trasladan por el territorio. Los demás regimientos, alrededor de unos 40, cada uno de los cuales controla nueve misiles de ojiva única, retienen los camiones aparcados en garajes. Esos misiles son más vulnerables que los alojados en silos subterráneos. Rusia posee además 36 misiles nucleares de diez ojivas nucleares transportados en vagones de ferrocarril, proyectados para camuflarlos entre su extensa red ferroviaria. Pero éstos permanecen confinados en guarniciones fijas por decisión de Gorbachov en 1991.

Ante semejante vulnerabilidad, Rusia ha aprestado algunos de sus submarinos en dique seco y misiles móviles aparcados en hangares para su lanzamiento inmediato, tras una primera señal de agresión, junto con los misiles de los silos. El tiempo disponible para decidir el lanzamiento se acorta con la presencia de submarinos americanos, británicos y franceses de patrulla por el Atlántico norte, a sólo 3200 kilómetros de Moscú. Tal proximidad implica que, en Rusia, los procedimientos de un lanzamiento nuclear requieren un tiempo de respuesta inferior a 15 minutos: unos minutos para detectar

Misiles en plataformas móviles

La supresión del estado de alerta de los misiles rusos instalados sobre plataformas terrestres móviles (modalidad que no existe en EE.UU.) podría empezar por retirar las ojivas de los 36 misiles ferroviarios a eliminar según los START II. Para los misiles en plataformas sobre camiones, una posibilidad sería alterar los garajes. Actualmente los techos de esos refugios están diseñados de modo que se abren deslizándose, permitiendo así que el lanzador se yerga y dispare el misil. Otras medidas podrían consistir en desbaratar la rampa lanzadora, de suerte que se tarde horas en restaurarla. *—B.G.H., H.A.F. y F.N. von H.*

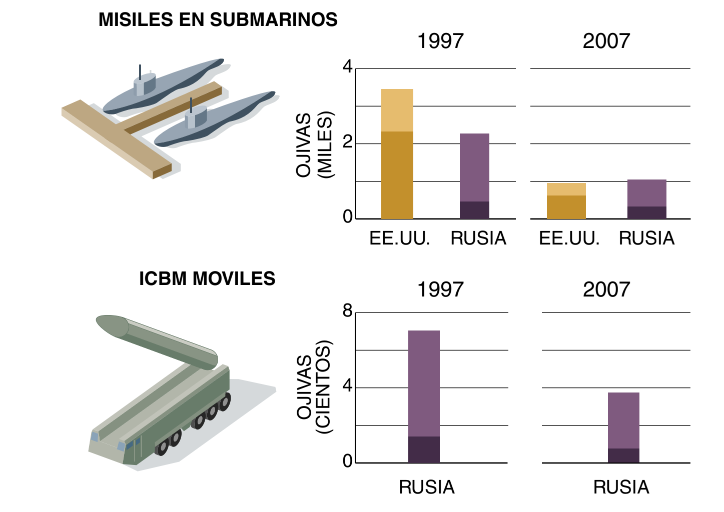


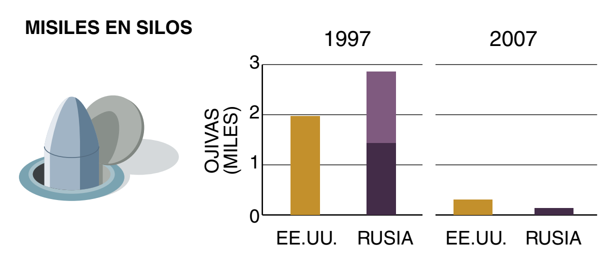
EL MISIL RUSO SS-25 puede dispararse desde un camión.

El presidente norteamericano recibe las últimas recomendaciones de los altos jefes militares y del secretario de defensa

28 minutos | *29 minutos* | *30 minutos* | *31 minutos* | *32 minutos* | *33 minutos* | *34 minutos*

3. LAS CIFRAS DE MISILES ESTRATEGICOS estadounidenses y rusos caerán a lo largo de los diez años próximos en cumplimiento de los Tratados de Reducción de Armas Estratégicas (START). Según esos mismos acuerdos, cada país podría conservar de 500 a 1000 ojivas listas para su lanzamiento. (La barras sombreadas indican el número de cabezas en alerta permanente.)





el ataque, otros minutos para una toma de decisión a alto nivel y los restantes para difundir la orden de lanzamiento. El Estado Mayor y los servidores de los misiles están adiestrados para intervenir en ese breve intervalo temporal. Además realizan ejercicios de entrenamiento con regularidad. En EE.UU. las fuerzas nucleares actúan con una espoleta de parecido retardo.

BRUCE G. BLAIR, HAROLD A. FEIVESON y FRANK N. VON HIPPEL se han dedicado al estudio de la estrategia nuclear. Blair sirvió durante cuatro años en el Mando Aéreo Estratégico de EE.UU. antes de doctorarse en investigación operativa por la Universidad de Yale. Hoy es analista de defensa en la Institución Brookings en Washington. Tras licenciarse en física teórica por la Universidad de California en Los Angeles, en 1959, Feiveson pasó cuatro años en la Agencia de Control de Armamentos y Desarme de EE.UU. Desde 1974, pertenece al claustro docente de la Universidad de Princeton, donde se doctoró en ciencias de la administración y política internacional. Von Hippel, que recibió un doctorado en física teórica de la Universidad de Oxford en 1962, sirvió en la oficina del consejero de ciencias presidencial en 1993 y 1994 como director adjunto para la seguridad nacional. Actualmente es profesor de asuntos públicos e internacionales en Princeton.

Es evidente que el carácter presuroso de tal proceso, desde la alerta hasta la toma de decisiones, entraña el riesgo de provocar un error catastrófico. El peligro se agrava por la erosión de la capacidad rusa para distinguir fiablemente entre los fenómenos naturales o las empresas espaciales pacíficas y un auténtico ataque nuclear. Sólo un tercio de sus radares de alerta temprana modernos funcionan al ciento por ciento; de los nueve lugares de su constelación de satélites detectores de misiles al menos dos están vacíos.

Los peligros derivados de esta merma de la capacidad técnica rusa se hallan amortiguados, hasta cierto punto, con el relajamiento de las tensiones que acompañó al fin de la guerra fría. Con un nuevo clima político menos tirante, los responsables de las decisiones en ambos bandos deberían mostrarse más propensos a dudar de la validez de los informes sobre lanzamientos de misiles. Sin embargo, el acoplamiento de los dos arsenales, dispuestos para responder en el acto, comporta el riesgo de un lanzamiento erróneo con la escalada consiguiente de réplicas y contrarréplicas. La posibilidad de un apocalipsis no cabe descartarla ni siquiera en condiciones normales. Además, si por culpa de una crisis política interna o internacional, el control de las armas nucleares rusas hubiera de sufrir tensiones, el peligro podría encresparse por momentos.

Durante la guerra fría, tales riesgos estaban subordinados a una exigencia principal de disuadir a un enemigo de quien se temía estar dispuesto a un ataque nuclear. Hoy esa tesis no puede defenderse, si es que alguna vez pudo. Cuando ambas naciones buscan ahora unas relaciones económicas normales y unos acuerdos de cooperación en el terreno de la seguridad, mantener los misiles prestos para su lanzamiento ante un simple indicio de ataque constituye un ejemplo de conducta harto imprudente. Pese a todo, ese planteamiento ha calado tanto en la administración, que sólo caerá con una presión sin cuartel de la opinión pública contra los responsables (en particular la magistratura de la nación respectiva).

La limitación del arsenal nuclear impuesto por los Tratados de Reducción de Armas Estratégicas (START) debería relajar la amenaza de un cruce nuclear accidental. Tales cambios, sin embargo, se sucederán sólo gradualmente. En el marco del START III, rubricado la primavera de 1997 en Helsinki por Yeltsin y Clinton, los arsenales estratégicos de Rusia y EE.UU. disminuirían hasta unas 2000 ojivas en cada bando hacia el año 2007. Pero si no se revisan los procedimientos que continúan en práctica, de aquí a 10 años la mitad de esas armas nucleares podrán seguir listas para su lanzamiento con un preaviso de escasos minutos.

El presidente de EE.UU. ordena el disparo de misiles balísticos contra Rusia

Disparo de los misiles MX y Minuteman

35 minutos | *36 minutos* | *37 minutos* | *38 minutos* | *39 minutos* | *40 minutos* | *41 minutos*

Se transmiten las órdenes de disparo a los submarinos y a los silos

Podría acelerarse la caída del riesgo de un lanzamiento fortuito "desalertando" los misiles, es decir, prolongando el tiempo necesario hasta dejarlos listos para despegar. Rusia y los Estados Unidos deben seguir ese camino, cada uno por su lado. Dos distinguidos proponentes del enfoque del avance paralelo en esa dirección son el ex senador por Georgia Sam Nunn y el general retirado George L. Butler, comandante en jefe del Mando Estratégico de EE.UU. entre 1991 y 1994. Se trata de una propuesta que gana adeptos por días en la sociedad civil y entre miembros del congreso norteamericano. En Rusia, el Ministerio de Defensa tiene en estudio esa medida.

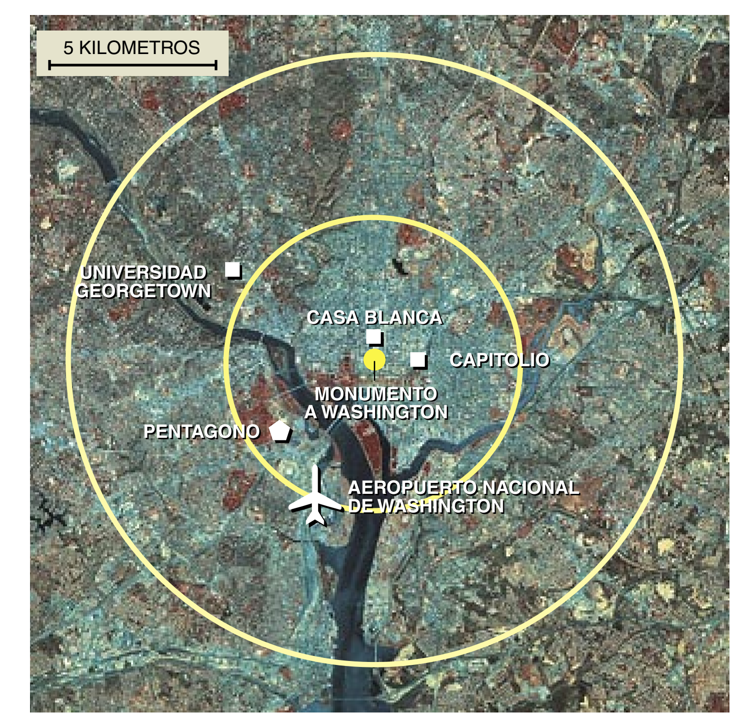
A finales de septiembre de 1991, el presidente George Bush dio un firme paso al frente en la inactivación de la alerta de misiles, cuando la Unión Soviética comenzó a disgregarse en la estela del intento de golpe de agosto. Por consejo del general Butler, Bush ordenó el cierre en los hangares de los numerosos bombarderos estratégicos norteamericanos que, durante décadas, habían permanecido listos para despegar con sólo un preaviso de minutos. Poco después, personal de la fuerza aérea descargaba y almacenaba las armas nucleares que transportaban aquellos aviones. Hubo más. Bush puso fin a la alerta de los misiles que debían eliminarse según el START I, lote formado por 450 cohetes Minuteman II instalados en silos, junto con los misiles a bordo de 10 submarinos Poseidon. Para estas importantes acciones se necesitaron sólo dos o tres días.

Una semana después, Gorbachov correspondía ordenando la desactivación de más de 500 cohetes con base en tierra y en seis submarinos estratégicos, prometiendo mantener sus bombarderos estratégicos en un bajo nivel de disponibilidad y retirando a guarnición los misiles ferroviarios. En los meses siguientes, ambos países retiraron miles de ojivas nucleares tácticas de corto alcance, que estaban desplegadas con sus respectivos ejércitos y armadas, y encerraron esas armas en almacenes centrales.

En 1994 Clinton y Yeltsin subieron otro peldaño. Acordaron que ambos países dejarían de apuntarse mutuamente con sus misiles estratégicos. Este gesto, aunque digno de aprecio, no reviste trascendencia militar. Los comandantes a cargo de los misiles pueden recargar en los ordenadores de guiado las coordenadas de los blancos en cosa de segundos. De hecho, el pacto de 1994 ni siquiera mitiga la preocupación acerca de un lanzamiento accidental ruso, puesto que un misil sin programar retomaría automáticamente su objetivo de guerra originario, que bien podría ser un silo de Minuteman en Montana o un cuartel general de Washington, Londres o París. Ni los misiles rusos ni sus congéneres americanos aceptan la orden de autodestruirse una vez lanzados.

Al poseer unas fuerzas más potentes y una cadena de mando más cohesionada, conviene que el gobierno de EE.UU. asuma la iniciativa en determinadas acciones voluntarias; por ejemplo, anunciar la retirada de las ojivas que mayor amenaza encierran contra el poder disuasorio de Rusia (especialmente las capaces de alcanzar sus silos de misiles y sus puestos de mando subterráneos). Las ojivas más amenazadoras son las desplegadas en los 50 misiles MX instalados en silos, armados con 10 ojivas cada uno, y las 400 ojivas W88 de alto rendimiento instaladas en las puntas de algunos de los misiles embarcados en submarinos Trident. Se recomienda también inmovilizar todos los Minuteman III instalados en tierra (unos 500 misiles), armados con tres ojivas cada uno, disminuir a la mitad el número de submarinos desplegados en tiempo de paz y reducir de ocho a cuatro el número de ojivas en cada misil a bordo de un submarino. Además, convendría alterar el funcionamiento de los submarinos con misiles balísticos de tal modo que las tripulaciones necesitaran aproximadamente un día para aprestar el lanzamiento.

Estas medidas dejarían casi 600 ojivas estadounidenses invulnerables en el mar, capaz cada una de destruir el núcleo de una metrópoli. Con esa fuerza, EE.UU. conservaría una capacidad más que suficiente para



4. LAS ZONAS DE DESTRUCCION, si en la vertical del monumento a Washington estallara una ojiva nuclear de 500 kilotones, cubrirían centenares de kilómetros cuadrados alrededor de la zona metropolitana de Washington, D.C. El círculo interior abarca el área donde la mayoría de las personas morirían a consecuencia inmediata del estallido. El círculo exterior delimita la superficie donde muchas más perecerían a resultas de las tormentas de fuego en áreas edificadas. Pero la zona de bajas se extendería aún más allá.

La primera ojiva nuclear rusa destruye Washington D.C.

42 minutos · 44 minutos · 45 minutos · 46 minutos · 47 minutos · 48 minutos

Una receta para el cambio

Para aliviar la inquietud que mueve a Rusia a no alterar el estado de alerta máxima y respuesta inmediata ante la primera señal en que tiene a sus misiles, el presidente de EE.UU. debería disponer lo siguiente:

1 Devolver de inmediato a los almacenes las ojivas de los misiles MX (que, en cualquier caso, habrá que retirar según el START II).

2 Inutilizar los misiles Minuteman III enclavijando todos sus conmutadores de seguridad (tal como se hizo con los Minuteman II en 1991). Si Rusia corresponde, habría que inmovilizar esos misiles, de manera que ponerlos de nuevo en estado de disparo requiera mucho más tiempo.

3 Retirar y guardar en almacén las ojivas que ahora van a bordo de los ocho submarinos Trident. El cumplimiento del START III exige su remoción y reducir de ocho a cuatro el número de cabezas a bordo de los submarinos restantes.

4 Desmontar las ojivas W88 de los misiles Trident II, almacenarlas y sustituirlas por armas menos potentes.

5 Permitir a Rusia que verifique tales medidas en las inspecciones anuales acordadas por el START I. Aceptar un mayor número de inspecciones si Rusia corresponde.

6 Poner todos los submarinos armados de misiles balísticos en un bajo nivel de alerta, de modo que hicieran falta al menos 24 horas para preparar el lanzamiento de las cabezas, y mantener a la mayoría de los submarinos a distancias fuera de tiro sobre objetivos rusos. Estudiar los procedimientos para que esos cambios sean verificables en el futuro y debatir posibles planes recíprocos con responsables rusos.

Incluso tras haber tomado estas medidas, seguirían navegando por el mar, lejos de toda inspección, seis submarinos con 576 ojivas a bordo. Por su parte, los Minuteman III inmovilizados sólo podrán destruirse por un ataque en masa contra unos 500 silos.

En respuesta a la iniciativa de EE.UU., el presidente ruso podría disponer lo siguiente:

1 Retirar las ojivas de los 46 misiles SS-42 instalados en silos o transportados en trenes (que, en cualquier caso, terminarán por retirarse según el START II).

2 Inmovilizar los demás misiles con base en silos que deben retirarse en cumplimiento del START II.

3 Eliminar las ojivas de los 15 submarinos armados de misiles balísticos que están destinados al desguace según los acuerdos de los START.

4 Dejar todos los submarinos de misiles balísticos (en puertos y navegando) en tal estado que no puedan lanzar sus misiles en menos de 24 horas.

5 Desbaratar las rampas de lanzamiento de los misiles balísticos instalados en camiones, de suerte que su restauración requiera algunas horas.

Después de haber tomado esas medidas, continuarán todavía a resguardo de toda inspección de 128 a 400 ojivas a bordo de dos submarinos, y de nueve a 18 ojivas SS-25 transportadas en lanzadores sobre camiones. Además, unas 2700 ojivas de ICBM instalados en silos sólo podrían ser destruidas mediante ataques con éxito contra unos 340 silos.

—B.G.B., H.A.F. y F.N. von H.

disuadir a cualquier agresor nuclear. Tan espectacular expediente dejaría perfectamente claras las intenciones de EE.UU. de no plantear a Rusia la amenaza de un primer golpe. Creemos que ese cambio de política persuadiría a Rusia a seguir el ejemplo, que pondría sus misiles fuera de la alerta de disparo inmediato. Asimismo, esos cambios acelerarían el cumplimiento de los acuerdos de desarme ya negociados para los START II y III. Según estimamos, la mayoría de los trabajos se habrían llevado a término en un año o dos.

Existen formas de comprobar si un arma nuclear ha quedado fuera de alerta. Desde satélites puede observarse el número de submarinos dotados de misiles balísticos que han pasado a dique seco. El resto de las medidas pueden comprobarse durante las inspecciones aleatorias *in situ* permitidas por el START I. A largo plazo, podrían idearse otros medios técnicos para calibrar con reiterada asiduidad la amenaza real de los misiles nucleares. Por ejemplo, podrían emplearse "sellos" electrónicos para asegurarse de que no se ha reemplazado un componente que se haya retirado de un misil. La integridad de esos sellos podría verificarse a distancia mediante un repetidor de satélite que transmita encriptado.

La ejecución de este proyecto de eliminación del estado de alerta en las fuerzas nucleares de EE.UU. y Rusia rebajaría notablemente la capacidad de uno y otro país de organizar un primer ataque. Eliminaría, por tanto, y de una sola vez, la capacidad y la justificación para mantener los misiles listos para el disparo ante cualquier señal. Los responsables tendrían que esperar a que acabase una alarma de ataque antes de decidir el contraataque, reduciéndose drásticamente el riesgo de un lanzamiento erróneo o sin autorización.

Admitimos que los jefes militares de EE.UU. y Rusia podrían insistir en conservar cierta fracción de los arsenales en alerta de alto nivel, acaso centenares de ojivas por bando, hasta que el resto de los países con armas nucleares (Gran Bretaña, Francia y China) se unieran en la adopción de medidas similares para reducir la disponibilidad de sus propios arsenales nucleares. Pero si EE.UU. y Rusia aspiran a establecer el modelo más exigente posible para la seguridad de sus fuerzas nucleares, deben avanzar con paso decidido hacia la supresión del estado de alerta en todos su misiles, y proseguir en la dilatación del tiempo necesario para reactivarlos.

La meta final no sería otra que separar de sus misiles las cabezas nucleares, para, andando el tiempo, ir destruyendo la mayoría de los misiles y ojivas almacenados. La ejecución de ese programa tan ambicioso requiere que los medios de verificación se refuercen para asegurar que cualquier estado nuclear pudiera saber si otro manipula los misiles.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GLOBAL ZERO ALERT FOR NUCLEAR FORCES. Bruce G. Blair. Brookings Institution, 1995.

CAGING THE NUCLEAR GENIE: AN AMERICAN CHALLENGE FOR GLOBAL SECURITY. Stansfield Turner. Westview Press, Boulder, Colorado, 1997.

THE FUTURE OF U.S. NUCLEAR WEAPONS POLICY. National Academy of Sciences. National Academy Press, 1997.

El último reducto de Fermat

Su teorema más notable tuvo desconcertadas durante más de tres siglos a las mentes más penetrantes. Pero, tras diez años de trabajo, un matemático ha conseguido desentrañarlo

Simon Singh y Kenneth A. Ribet

En junio de 1997, 500 matemáticos se congregaron en el aula magna de la Universidad de Göttingen para presenciar la entrega del prestigioso premio Wolfskehl a Andrew J. Wiles, de la Universidad de Princeton. Tal galardón, establecido en 1908 para quien lograse demostrar el célebre teorema magno de Fermat, también llamado "el último teorema", equivalía en aquella época a dos millones de dólares actuales. La hiperinflación y la devaluación del marco habían reducido el premio a tan sólo unos 50.000 dólares en el verano de 1997. Pero eso nada importaba. Porque Wiles, al demostrar el enigma dejado por Fermat en el siglo XVII, había hecho realidad un sueño de su infancia y dado término a un decenio de intenso esfuerzo. A juicio de los invitados allí reunidos, la demostración de Wiles prometía revolucionar el futuro de la matemática.

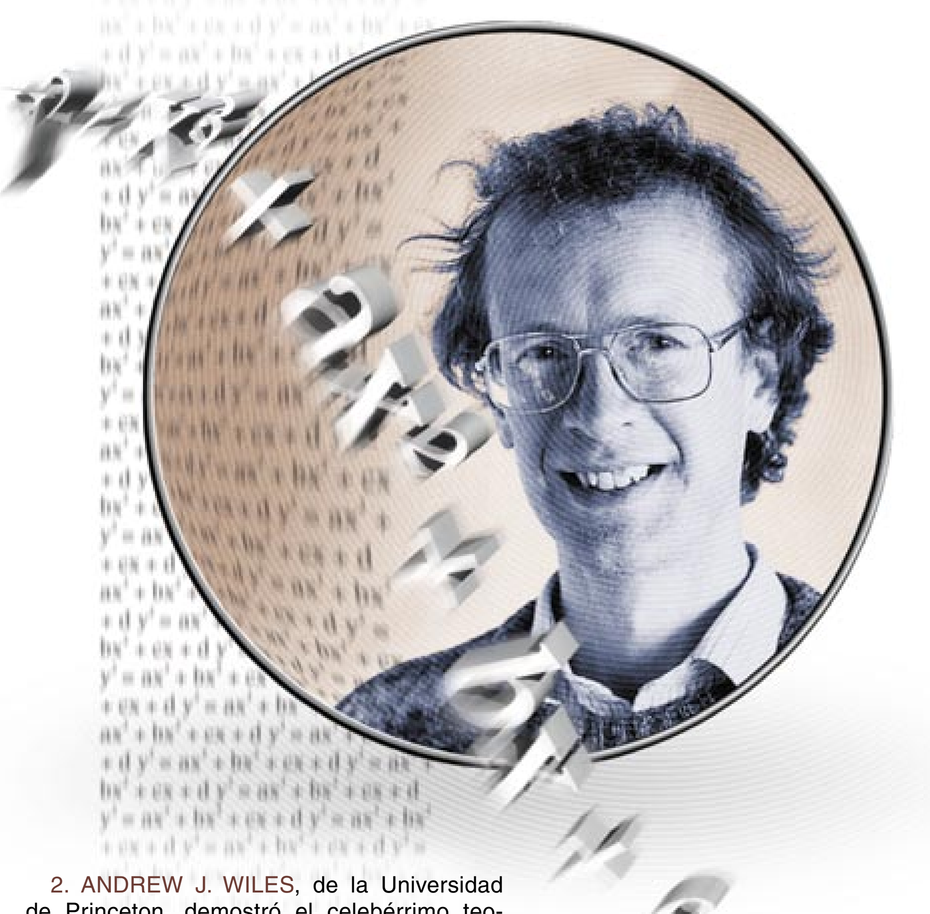
Y la verdad es que para llevar a cabo su cálculo, de 100 páginas, Wiles tuvo que tomar y desarrollar muchas ideas de la matemática moderna. En particular, hubo de habérselas con la conjetura de Shimura-Taniyama, una idea profunda surgida en nuestro siglo, que cala con hondura en la geometría algebraica y en el análisis de variable compleja. Y en el proceso, Wiles forjó un eslabón entre estas dos grandes ramas de la matemática. Es seguro, en consecuencia, que las ideas y resultados de cualquiera de estos campos serán fuente de inspiración para nuevos resultados en el otro. Además, ahora que se ha tendido el puente, es posible que salgan a la luz otras conexiones entre reinos matemáticos distantes.

El príncipe de los aficionados

Pierre de Fermat nació el 20 de agosto de 1601 en Beaumont-de-Lomagne, pequeña ciudad del suroeste de Francia. Hizo carrera en la administración local y en la judicatura. A los jueces, para garantizar su imparcialidad, les estaba vedado participar en la vida social de su localidad, por lo que cada tarde Fermat se retiraba a su estudio y se concentraba en su gran afición, la matemática. Pese a no ser su profesión, alcanzó grandes logros en el dominio de la matemática: a él se deben en buena medida los cimientos del cálculo de probabilidades y del cálculo diferencial. Isaac Newton, padre del cálculo diferencial moderno, dijo que había basado su trabajo en "el método de trazado de tangentes de Monsieur Fermat".

Fermat era, por encima de todo, un maestro en la teoría de números, ciencia que estudia los números enteros y las relaciones entre ellos. Solía escribir a otros matemáticos exponiéndoles su trabajo en un determinado problema, preguntándoles si poseían el ingenio suficiente para igualar su solución. Estos desafíos, sumados a que jamás revelaba sus propios cálculos, provocaban en otros no poca frustración. René Descartes,

1. PIERRE DE FERMAT, un maestro de la teoría de números del siglo XVII, solía escribir a otros matemáticos preguntándoles si tendrían el ingenio de igualar sus soluciones. Concibió su más famoso problema, el llamado "último teorema", mientras estudiaba la *Arithmetica* de Diofanto de Alejandría. Fermat afirmaba que no existían soluciones enteras no triviales para la ecuación $a^n + b^n = c^n$, donde n es un número entero cualquiera, mayor que 2. En el margen de *Arithmetica*, Fermat dejó anotado un comentario que ha exasperado a los matemáticos de tres siglos: "Tengo una demostración maravillosa de esta proposición, que este margen es demasiado estrecho para contener."



2. ANDREW J. WILES, de la Universidad de Princeton, demostró el celebérrimo teorema de Fermat en 1994, tras un decenio de concentrados esfuerzos. Para completar su cálculo, de 100 páginas, Wiles necesitó recurrir a muchas y modernas ideas de las matemáticas, y desarrollarlas más todavía. En particular, tuvo que demostrar la conjetura de Shimura-Taniyama para un subconjunto de curvas elípticas, objetos descritos por ecuaciones cúbicas tales como $y^2 = x^3 + ax^2 + bx + c$.

cuyo trabajo más notable es seguramente la geometría analítica, decía de Fermat que era un jactancioso. El matemático inglés John Wallis se refirió a él en cierta ocasión llamándole "ese condenado francés."

Fermat formuló su problema más célebre, hoy conocido por el "último teorema", mientras estudiaba un texto matemático de la Grecia clásica, la *Arithmetica*, de Diofanto de Alejandría. En el libro se examinaban las soluciones con números enteros de la ecuación $a^2 + b^2 = c^2$, la fórmula de Pitágoras que establece la relación entre los lados de un triángulo rectángulo. Esta ecuación posee una infinidad de conjuntos de soluciones enteras, como $a = 3$, $b = 4$, $c = 5$, que son conocidas por ternas pitagóricas. Fermat llevó la fórmula un paso más allá y llegó a la conclusión de que, salvo la trivial, no existen soluciones para toda una familia de ecuaciones similares, de la forma $a^n + b^n = c^n$, donde n representa un número entero cualquiera mayor que 2.

Resulta chocante que, habiendo una infinidad de ternas pitagóricas, no existan ternas de Fermat. Aun así, Fermat creía poder respaldar su aserto con una demostración rigurosa. En el margen de *Arithmetica*, aquel genio de la perversidad dejó anotado un comentario que ha sumido en el desconcierto a muchas generaciones de matemáticos: "Tengo una demostración maravillosa de esta proposición, que este margen es demasiado estrecho para contener." Fermat hizo muchas anotaciones exasperantes similares y, tras su muerte, su hijo publicó una edición de *Arithmetica* en la que figuraban estos incordios. Todos los teoremas fueron cayendo, demostrados uno tras otro, hasta quedar por fin tan sólo el último de Fermat.

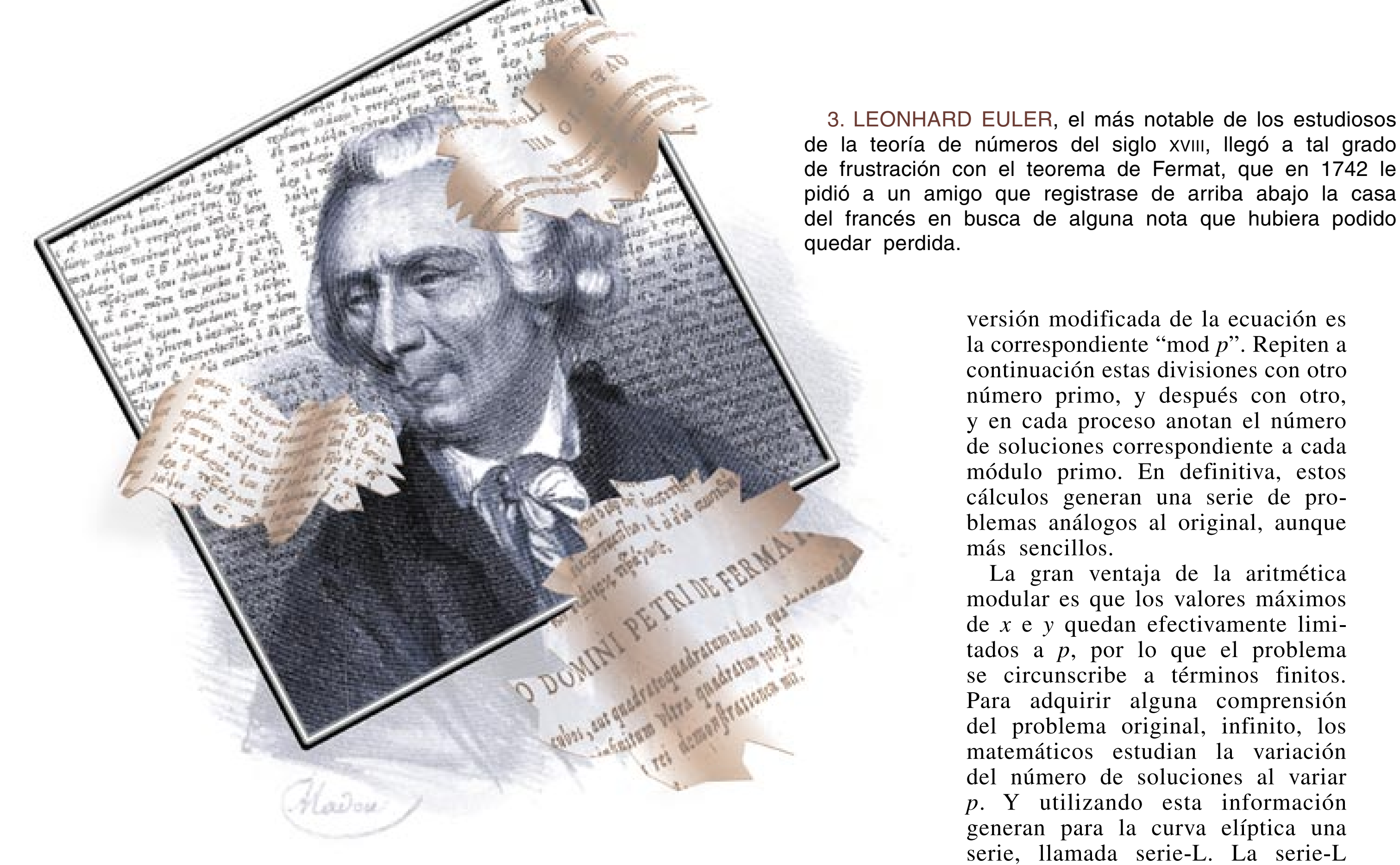
Numerosos matemáticos batallaron con el último teorema y fracasaron. En 1742, Leonhard Euler, el más notable de los estudiosos de la teoría de números del siglo XVIII, llegó a tal grado de frustración por su incapacidad para demostrar el último teorema, que le pidió a un amigo que registrase la casa de Fermat, por si quedase en ella alguna nota o papel de importancia vital. En el siglo XIX, Sophie Germain (que a causa de los prejuicios contra las mujeres en matemáticas tuvo que realizar sus estudios con el seudónimo de Monsieur Leblanc) consiguió el primer progreso importante. Germain demostró un teorema general que recorría buena parte del camino hacia la solución de la ecuación de Fermat para valores de n que sean números primos mayores que 2 y para los que $2n + 1$ sea también número primo. (Recordemos que un número primo sólo es divisible por sí mismo y por la unidad.) Pero la demostración completa para tales exponentes, o para cualesquiera otros, seguía hallándose fuera de su alcance.

A comienzos del siglo XX, un industrial alemán llamado Paul Wolfskehl, ofreció 100.000 marcos a quienquiera que lograse zanjar el problema de Fermat. Según ciertos historiadores, Wolfskehl se encontraba en cierta ocasión casi al borde del suicidio, pero llegó a obsesionarse de tal modo por demostrar el último teorema que su deseo de morir desapareció. En vista de lo ocurrido, Wolfskehl reformó su testamento. El premio era su forma de pagar la deuda contraída con el problema que le salvó la vida.

Irónicamente, al tiempo que el premio Wolfskehl acicateaba a los aficionados entusiastas en busca de una demostración, los matemáticos profesionales estaban perdiendo la esperanza de lograrla. Al serle preguntado a David Hilbert, genial matemático alemán, por qué no había intentado jamás lograr una demostración del último teorema de Fermat, respondió: "Antes de empezar tendría que dedicarle tres años de intenso estudio, y no puedo desperdiciar tanto tiempo en un probable fracaso." El problema seguía ocupando un lugar especial en el corazón de quienes profesaban en teoría de números, mas para ellos el teorema de Fermat era lo que la alquimia para los químicos: un sueño romántico y descabellado de una era periclitada.

El sueño de la infancia

A los niños, desde luego, los sueños románticos les encantan. Y en 1963, cuando contaba diez años, Wiles quedó cautivado por el último teorema de Fermat. Había leído su historia en una biblioteca pública de Cambridge, donde vivía, y se prometió a sí mismo hallar una demostración. En la escuela, sus maestros trataron de disuadirle, para que no perdiera tiempo en lo imposible. Llegado a la facultad, también sus



3. LEONHARD EULER, el más notable de los estudiosos de la teoría de números del siglo XVIII, llegó a tal grado de frustración con el teorema de Fermat, que en 1742 le pidió a un amigo que registrase de arriba abajo la casa del francés en busca de alguna nota que hubiera podido quedar perdida.

profesores trataron de disuadirle. Por fin, el supervisor de su trabajo de graduación, en la Universidad de Cambridge, logró conducirle hacia matemáticas situadas más en el curso principal, a saber, en el fructífero campo de investigación donde se recogen curvas elípticas. Los griegos del mundo clásico estudiaron ya curvas elípticas, que aparecen en *Arithmetica*. Mal podía saber Wiles que este estudio acabaría por traerle de regreso al último teorema de Fermat.

Las curvas elípticas no son elipses. Reciben tal nombre porque están descritas por ecuaciones cúbicas, similares a las utilizadas para calcular el perímetro de una elipse. En general, las ecuaciones cúbicas correspondientes a curvas elípticas adoptan la forma $y^2 = x^3 + ax^2 + bx + c$, siendo a, b y c números enteros que verifican ciertas condiciones sencillas. Se dice de tales ecuaciones que son de grado 3, porque el exponente más elevado que contienen es un cubo.

En teoría de números es habitual tratar de conocer el número de las llamadas soluciones racionales, que son las formadas por números enteros o fracciones, correspondientes a diversas ecuaciones. Las ecuaciones lineales y las cuadráticas, que son las de grados 1 y 2, respectivamente, o bien carecen de soluciones racionales o bien las poseen en número infinito, y resulta sencillo decidir cuál es el caso. Cuando la ecuación es complicada, caso típico de las ecuaciones de grado 4 o superior, el número de soluciones es siempre finito, hecho conocido por conjetura de Mordell, demostrada por el matemático alemán Gerd Faltings en 1983. Pero las curvas elípticas plantean un problema y una dificultad especiales. Pueden tener un número finito o infinito de soluciones, y no hay una forma sencilla de saber cuál es el caso.

Para simplificar los problemas concernientes a curvas elípticas, es frecuente examinarlos mediante matemática modular. Los matemáticos dividen las incógnitas x e y de la ecuación cúbica por un número primo p y conservan solamente el resto. Esta versión modificada de la ecuación es la correspondiente "mod p". Repiten a continuación estas divisiones con otro número primo, y después con otro, y en cada proceso anotan el número de soluciones correspondiente a cada módulo primo. En definitiva, estos cálculos generan una serie de problemas análogos al original, aunque más sencillos.

La gran ventaja de la aritmética modular es que los valores máximos de x e y quedan efectivamente limitados a p, por lo que el problema se circunscribe a términos finitos. Para adquirir alguna comprensión del problema original, infinito, los matemáticos estudian la variación del número de soluciones al variar p. Y utilizando esta información generan para la curva elíptica una serie, llamada serie-L. La serie-L es, en esencia, una serie de potencias infinita, en la que el valor del coeficiente de cada potencia p-ésima está determinado por el número de soluciones en módulo p.

A decir verdad, también existe otra categoría de objetos matemáticos, las llamadas formas modulares, que poseen series-L. No debemos confundir las formas modulares con la aritmética modular. Las formas modulares son funciones de variable compleja de un tipo especial. (Los números complejos son de la forma $x + iy$, donde x e y son números reales; simbolizamos por i la unidad imaginaria, cuyo cuadrado es -1.)

Lo que confiere a las formas modulares su carácter especial es que el número complejo sobre el que operan se puede transformar de muchas formas y aun así la función proporcionará prácticamente el mismo resultado. En este aspecto, las formas modulares son notables. Algo se parecen a ellas las funciones trigonométricas, en la medida en que un ángulo q puede transformarse sumándole 2π sin que cambie el valor de la función: sen q = sen $(q + 2\pi)$. En las funciones modulares, esta propiedad se denomina simetría; las funciones trigonométricas la presentan sólo en grado limitado. Las formas modulares, por el contrario, exhiben un inmenso grado de simetría. Tanto es así que, cuando el matemático francés

SIMON SINGH y KENNETH A. RIBET comparten un vivo interés por el último teorema de Fermat. Singh es físico de partículas que se mueve con soltura en el mundo de la divulgación. Ribet enseña matemática en la Universidad de California en Berkeley; su trabajo se centra en la teoría de números y en la geometría algebraica aritmética. Ribet y Abbas Bahri fueron galardonados con el primer premio Fermat por su demostración de que la conjetura Shimura-Taniyama implica el último teorema de Fermat.

4. GORO SHIMURA Y YUTAKA TANIYAMA (*fotos superior e inferior, respectivamente*) desarrollaron en los años cincuenta una idea que acabaría siendo útil en la demostración de Wiles. Su conjetura se refería a las formas modulares, que son funciones de variable compleja, esto es, de números $x + iy$, donde i, la unidad imaginaria, es raíz cuadrada de –1. Ambos matemáticos propusieron que cada curva elíptica puede asociarse con una forma modular, cuyas respectivas series-L fueran iguales. Taniyama, trágicamente, no vivió para ver el éxito de Wiles: se suicidó el 17 de noviembre de 1958.

Henri Poincaré descubrió las primeras formas modulares a finales del siglo XIX, le costó gran trabajo aceptar su simetría. Poincaré explicó a sus colegas que durante dos semanas, en cuanto se despertaba, se ponía a buscar un error en sus cálculos. Al decimoquinto día acabó dándose por vencido, y dio por bueno que las formas modulares presentan simetría en grado extremo.

Unos diez años antes de que Wiles supiera quién era Fermat, dos jóvenes matemáticos japoneses, Goro Shimura y Yutaka Taniyama, desarrollaron una idea relativa a formas modulares que acabaría sirviendo de piedra angular en la demostración de Wiles. Ambos tenían la convicción de que las formas modulares y las curvas elípticas guardaban entre sí una relación fundamental, a pesar de que las curvas elípticas parecían pertenecer a un campo de la matemática completamente diferente. En particular, dado que las formas modulares poseen series-L —si bien, deducidas a partir de principios distintos que las de las curvas elípticas— ambos matemáticos propusieron que a cada curva elíptica se le podía asociar una forma modular, de modo que las series-L de una y otra se correspondieran.

Shimura y Taniyama sabían que, de estar en lo cierto, las consecuencias serían extraordinarias. En primer lugar, los matemáticos suelen tener mayor información sobre la serie-L de una forma modular que sobre la de una curva elíptica. Por consiguiente, dejaría de ser necesario la compilación de la serie-L de una curva elíptica, porque sería idéntica a la de la forma modular correspondiente. Con mayor generalidad, la construcción de tal puente entre dos ramas de la matemática desconectadas hasta ese momento podría beneficiar a ambas: en principio, cada disciplina podría verse enriquecida por los conocimientos ya cosechados en la otra.

La conjetura de Shimura-Taniyama, cual fue formulada por Shimura en los primeros años sesenta, afirma que cada curva elíptica puede emparejarse con una forma modular; dicho de otro modo: todas las curvas elípticas son modulares. Aunque nadie sabía cómo demostrarlo, con el paso de los decenios tal hipótesis fue adquiriendo un peso cada vez mayor. En los años setenta, por ejemplo, era corriente que los matemáticos dieran por válida la conjetura de Shimura-Taniyama y dedujeran de ella algún resultado nuevo. Con el tiempo, abundaron los hallazgos importantes que llegaron a depender de tal conjetura, a pesar de que eran pocos los estudiosos que confiaban en que fuera demostrada en este siglo. Trágicamente, uno de los hombres que la inspiraron no vivió para ver su definitiva importancia. El 17 de noviembre de 1958, Yutaka Taniyama se suicidó.

El eslabón perdido

En otoño de 1984, en un simposio celebrado en la alemana Oberwolfach, Gerhard Frey, de la Universidad de Saarland, pronunció una conferencia que apuntaba hacia una nueva estrategia para atacar el último teorema de Fermat. El teorema afirma que la ecuación de Fermat no posee soluciones con números enteros. Los matemáticos, para poner a prueba los enunciados de este tipo,



5. SOPHIE GERMAIN hubo de realizar sus estudios con el nombre de Monsieur Leblanc, a causa de los prejuicios contra las mujeres matemáticas. Consiguió el primer progreso importante del siglo XIX, demostrando un teorema que recorría buena parte del camino hacia la solución de la ecuación de Fermat para valores de n que sean números primos mayores que 2 y para los cuales $2n + 1$ sea también primo.



6. GERHARD FREY propuso en 1984 una nueva estrategia para atacar el último teorema de Fermat: Supongamos que A y B sean potencias n-ésimas perfectas, tales que $A+B$ sea también una potencia n-ésima, es decir, que sean solución de la ecuación de Fermat. Entonces A y B pueden utilizarse como coeficientes en una curva elíptica especial: $y^2 = x(x-A)(x+B)$; el "discriminante" de esta curva elíptica, $A^2B^2(A+B)^2$, es también una potencia n-ésima perfecta. Frey sospechaba que una curva elíptica tal no podía ser modular. Dicho de otro modo, Frey señalaba que, si alguien demostrase que la conjetura de Shimura-Taniyama es verdadera o que todas las curvas elípticas son modulares, podría entonces demostrarse que la ecuación elíptica $y^2 = x(x-A)(x+B)$ no existe; en cuyo caso, no habría solución para la ecuación de Fermat y quedaría demostrado el teorema de Fermat.

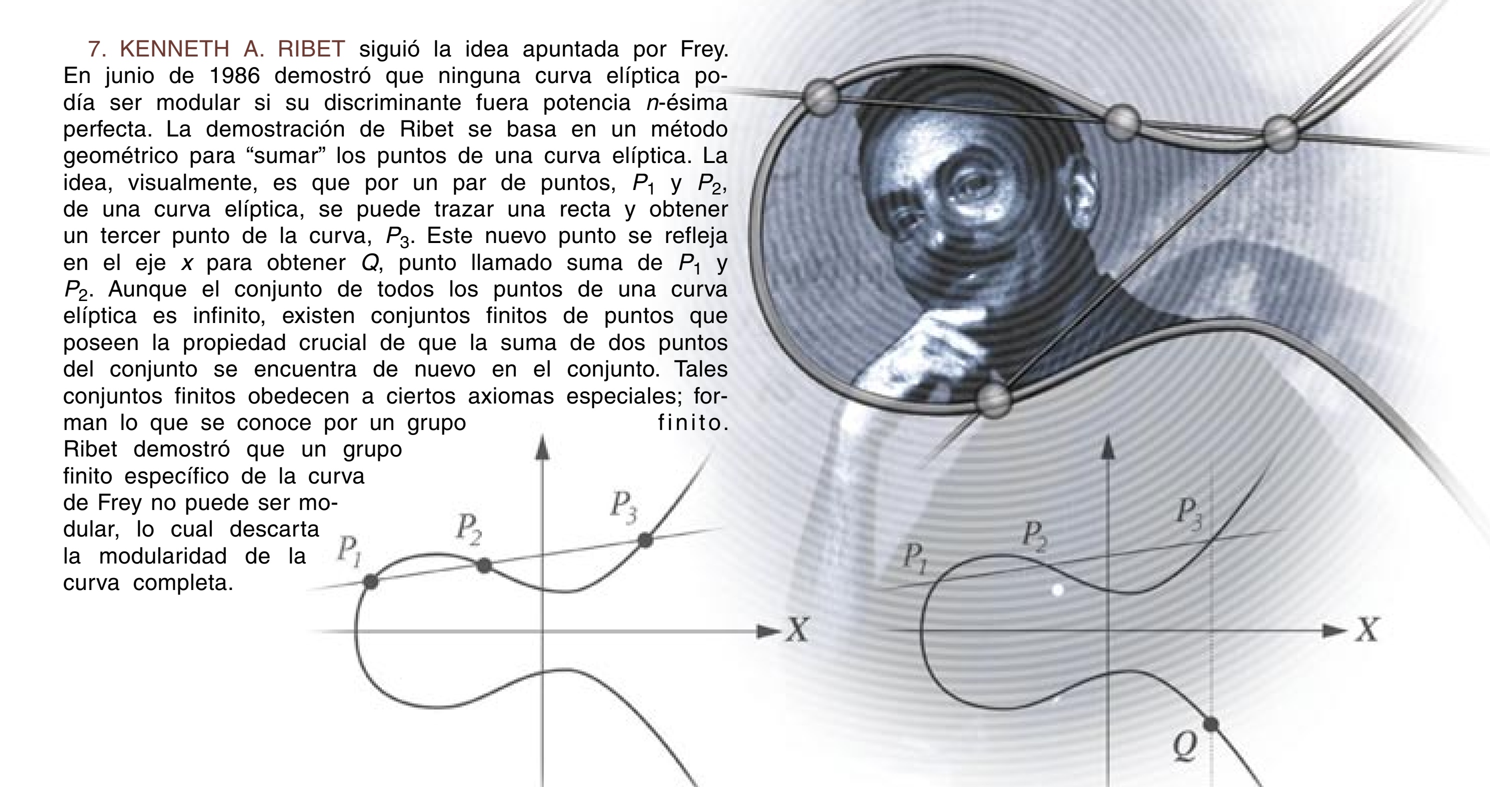
suelen empezar suponiendo que es falsa, y proceden después a explorar las consecuencias de tal suposición. Decir que el último teorema de Fermat es falso equivale a decir que existen dos potencias n-ésimas perfectas cuya suma es una tercera n-ésima potencia.

La idea de Frey se desarrollaba como sigue: Supongamos que A y B son potencias n-ésimas perfectas tales que $A+B$ torna a ser una potencia n-ésima, es decir, que constituyen una solución de la ecuación de Fermat. En tal caso, A y B se utilizan como coeficientes de una curva elíptica especial: $y^2 = x(x-A)(x+B)$. Una expresión que se calcula de forma rutinaria siempre que se estudian curvas elípticas es el "discriminante" de la curva elíptica, $A^2B^2(A+B)^2$. Dado que A y B son soluciones de la ecuación de Fermat, el discriminante es una potencia n-ésima perfecta.

El punto crucial de la táctica de Frey estriba en que, si el último teorema de Fermat es falso, entonces se podrían utilizar soluciones enteras como A y B para construir una curva elíptica cuyo discriminante fuese una potencia n-ésima perfecta. Así pues, una demostración de que el discriminante de una curva elíptica nunca puede ser una n-ésima potencia contendría, implícitamente, una demostración del último teorema de Fermat. Frey no atinaba a ver cómo construir tal demostración. Sí sospechaba, no obstante, que una curva elíptica cuyo discriminante fuese una potencia n-ésima perfecta —de existir— no podría ser modular. Dicho de otro modo, una tal curva elíptica pondría en tela de juicio la conjetura de Shimura-Taniyama. Razonando en sentido retrógrado, Frey señaló que, si se demostrase que la conjetura Shimura-Taniyama es verdadera y que la ecuación elíptica $y^2 = x(x-A)(x+B)$ no es modular, entonces se habría demostrado que la ecuación elíptica no puede existir. En tal caso, la solución de la ecuación de Fermat no puede existir, y habría quedado demostrado que el último teorema de Fermat es verdadero.

Fueron muchos los matemáticos que exploraron esta conexión entre Fermat y Shimura-Taniyama. Su primer objetivo consistió en demostrar que la curva elíptica de Frey, $y^2 = (x-A)\ (x+B)$, era realmente no-modular. Jean-Pierre Serre, del Collège de France, y Barry Mazur, de la Universidad de Harvard, efectuaron aportaciones importantes en esta dirección. Y en junio de 1986, uno de los autores (Ribet) construyó por fin una demostración completa del aserto. No es posible describir en este artículo el razonamiento completo, pero sí daremos algunas indicaciones.

De entrada, la demostración de Ribet depende de un método geométrico para "sumar" dos puntos de una curva elíptica [*véase la figura 7*]. Visualmente, la idea es que, si proyectamos una recta que pase por un par de soluciones distintas, P_1 y P_2, la recta corta a la curva en un

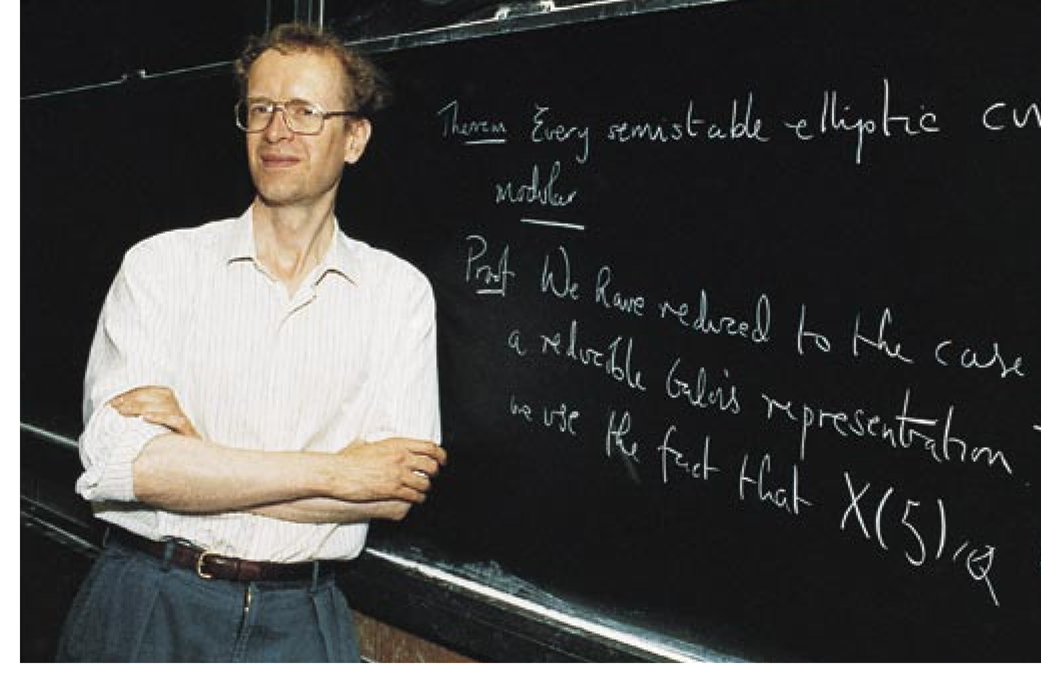


7. KENNETH A. RIBET siguió la idea apuntada por Frey. En junio de 1986 demostró que ninguna curva elíptica podía ser modular si su discriminante fuera potencia n-ésima perfecta. La demostración de Ribet se basa en un método geométrico para "sumar" los puntos de una curva elíptica. La idea, visualmente, es que por un par de puntos, P_1 y P_2, de una curva elíptica, se puede trazar una recta y obtener un tercer punto de la curva, P_3. Este nuevo punto se refleja en el eje x para obtener Q, punto llamado suma de P_1 y P_2. Aunque el conjunto de todos los puntos de una curva elíptica es infinito, existen conjuntos finitos de puntos que poseen la propiedad crucial de que la suma de dos puntos del conjunto se encuentra de nuevo en el conjunto. Tales conjuntos finitos obedecen a ciertos axiomas especiales; forman lo que se conoce por un grupo finito. Ribet demostró que un grupo finito específico de la curva de Frey no puede ser modular, lo cual descarta la modularidad de la curva completa.

tercer punto, al que podríamos llamar, de un modo provisional, suma de P_1 y P_2. Una variante ligeramente más complicada, aunque más valiosa, de esta adición es la siguiente: se suman primero dos puntos y se deduce después un punto nuevo, P_3, en la forma ya descrita; por último, se efectúa una simetría respecto al eje de abscisas, obteniendo así la suma final, Q.

Esta especial forma de adición puede aplicarse a cualquier par de puntos pertenecientes al conjunto infinito de todos los puntos de una curva elíptica. Ahora bien, la operación reviste particular interés porque existen conjuntos finitos de puntos que tienen la propiedad crucial de que la suma de dos puntos del conjunto pertenece también al conjunto. Estos conjuntos finitos de puntos forman un grupo: un conjunto de puntos que obedecen a un puñado de axiomas sencillos. Resulta que, si la curva elíptica es modular, también lo son los puntos de cada grupo finito de la curva elíptica. Ribet demostró que un grupo finito específico de la curva de Frey no puede ser modular, lo que descarta la modularidad de la curva completa.

Durante tres siglos y medio, el último teorema había sido un problema aislado, un rompecabezas curioso e imposible ubicado en las lindes de la matemática. En 1986, Ribet, edificando sobre el trabajo de Frey, lo había llevado al escenario central. Resultaba posible demostrar el último teorema de Fermat probando la conjetura de Shimura-Taniyama. Wiles, que era por entonces profesor en Princeton, no perdió un minuto. Durante siete años trabajó en total secreto. No solamente quería evitar la presión de la atención pública, sino que esperaba evitar que otros copiasen sus ideas. A lo largo de ese período, sólo su esposa conocía su obsesión; se enteró en el viaje de novios.



8. "¡EUREKA!" exclamó jubiloso medio mundo cuando Wiles reveló su primera demostración del último teorema de Fermat en una lección pronunciada en junio de 1993. Sin embargo, poco después los expertos hallaron en ella un fallo serio. Wiles analizó el error con un antiguo alumno suyo, Richard Taylor. Entre ambos se esforzaron en adaptar el método utilizado por Wiles y aplicaron herramientas que Wiles antes había rechazado. Por fin, el 19 de septiembre de 1994, lograron su propósito.

Siete años de sigilo

Wiles tuvo que ensamblar muchos de los principales descubrimientos logrados por la teoría de números en el siglo XX. Cuando tales ideas resultaban inadecuadas, se vio obligado a crear otras herramientas y técnicas. Describe su experiencia de hacer matemáticas como un viaje por una mansión oscura e inexplorada. "Uno penetra en la primera sala de la mansión, en plena obscuridad. Vas dando tumbos por ella, tropezando con el mobiliario, pero poco a poco vas averiguando dónde está cada mueble. Al final, más o menos al cabo de seis meses, atinas con el interruptor de la luz. La enciendes y, de pronto, todo queda iluminado; percibes dónde te encuentras exactamente. Te trasladas entonces a la sala siguiente y pasas otros seis meses en la oscuridad. Por ello, cada uno de estos progresos, aunque a veces sean sólo momentáneos, a veces a lo largo de un período de un día o dos, son la culminación de muchos meses de ir dando trompicones por la oscuridad, y no podrían existir sin esos meses que los precedieron."

Wiles no tuvo que demostrar la conjetura de Shimura-Taniyama en su globalidad. Bastó con que demostrara que un determinado subconjunto de las curvas elípticas —entre las que se contaría la hipotética curva elíptica que Frey proponía, si existiera— es modular. No se trataba de ninguna simplificación desmesurada. Este subconjunto sigue siendo de tamaño infinito y contiene la mayoría de los casos interesantes. La estrategia de Wiles se valió de las mismas técnicas empleadas por Ribet, más otras muchas. Y lo mismo que en el argumento de Ribet, hemos de ceñirnos a ofrecer un guión sumario de sus principales rasgos.

La dificultad consistía en demostrar que cada curva elíptica del subconjunto de Wiles es modular. A tal fin, Wiles sacó partido de la propiedad de que los puntos de las curvas elípticas forman un grupo algebraico y aplicó un teorema de Robert P. Langlands, del Instituto de Estudios Avanzados en Princeton, y de Jerrold Tunnell, de la Universidad Rutgers. El teorema demuestra, para cada curva elíptica del conjunto de Wiles, que un grupo específico de puntos situados dentro de la curva elíptica es modular. Esta condición es necesaria, pero no suficiente, para demostrar que la curva elíptica, como un todo, es modular.

El grupo en cuestión consta de sólo nueve elementos, por lo que se podría imaginar que su modularidad supone un paso extremadamente pequeño hacia la modularidad completa. Para cerrar este hiato, Wiles se propuso examinar grupos cada vez mayores, pasando de grupos de tamaño 9 a los de tamaño 9^2, o sea, 81, y después a 9^3, o sea, 729, y así sucesivamente. Si pudiera alcanzar un grupo infinitamente grande y demostrar que también es modular, ello equivaldría a demostrar que la curva total es modular.

Wiles llevó a cabo esta tarea mediante un proceso basado, a grandes rasgos, en la inducción. Tenía que demostrar que, si un grupo era modular, entonces también habría de serlo el grupo de tamaño inmediatamente

siguiente. Este método es similar al de derribar dominós: para tumbar un número infinito de ellos basta asegurarse de que la caída de cada dominó implicará siempre el derribo del siguiente. Al cabo, Wiles se sintió seguro de que su demostración estaba completa, y el 23 de junio de 1993 anunció su resultado en una conferencia celebrada en el Instituto Isaac Newton de Ciencias Matemáticas, en Cambridge. Su sigiloso programa de investigación había culminado con éxito, y la comunidad matemática y la prensa de todo el mundo quedaron sorprendidos y encantados con su demostración.

Al mismo tiempo que se intensificaba el clamor de los medios de comunicación, daba comienzo el proceso oficial de revisión por expertos. Casi inmediatamente, Nicholas M. Katz, de Princeton, descubría un fallo fundamental y devastador en uno de los pasos del razonamiento de Wiles. Este, en su proceso de inducción, había recurrido a un método de Victor A. Kolyvagin, de la Universidad Johns Hopkins, y de Matthias Flach, del Instituto de Tecnología de California, con el fin de demostrar que el grupo es modular. Pero según parecía, tal método no era utilizable en este ejemplo particular. El sueño de la infancia de Wiles se había tornado en una pesadilla.

Durante los 14 meses siguientes, Wiles se escondió de todos, dedicándose a analizar el error con un antiguo alumno suyo, Richard Taylor. Ambos lucharon a brazo partido con el problema, tratando de "parchear" el método que Wiles había utilizado ya, y de aplicar otras herramientas que antes había rechazado. Estaban a punto de admitir su derrota y de dar a conocer su fallida demostración, para que otros pudieran tratar de enmendarla, cuando el 19 de septiembre de 1994 hallaron la clave. Muchos años antes, Wiles había pensado en utilizar un método alternativo basado en la teoría de Iwasawa, pero tras forcejear con ella la abandonó. Ahora se dio cuenta de que lo que estaba provocando el fallo del método Kolyvagin-Flach era exactamente lo que haría que la teoría de Iwasawa tuviera éxito.

Wiles recuerda su reacción ante el descubrimiento: "Era indescriptiblemente hermoso, sencillo y elegante. La primera noche volví a casa y la dejé dormir. Torné a repasarla a la mañana siguiente, y bajé y le dije a mi esposa, 'Lo he conseguido. Me parece que lo he encontrado.' Y era algo tan inesperado que ella pensó que yo estaba hablando de un juguete de los niños o algo parecido. Por eso contestó, '¿Qué es lo que tienes?' Yo respondí, 'He arreglado mi demostración. Lo he conseguido.'"

Para Wiles, la concesión del premio Wolfskehl señala el fin de una obsesión que duró más de 30 años: "Habiendo resuelto este problema, se tiene, sin duda, un sentimiento de libertad. Tan obsesionado estaba por este problema que durante ocho años estuve pensando en él casi todo el tiempo: cuando me despertaba por la mañana o cuando me iba a dormir por la noche. Esa odisea particular arribó a puerto. Mi mente se ha serenado."

Mas, para otros matemáticos, quedan pendientes cuestiones de primera importancia. En particular, todos están de acuerdo en que la demostración de Wiles es demasiado complicada y moderna para ser la que Fermat tenía en mente cuando escribió su nota marginal. O bien Fermat se equivocaba, y su demostración, si es que existió, era errónea, o bien está por inventarse una demostración sencilla y sagaz.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MODULAR ELLIPTIC CURVES AND FERMAT'S LAST THEOREM. Andrew Wiles en *Annals of Mathematics*, vol. 141, n.º 3, páginas 443-551; mayo de 1995.

RING THEORETIC PROPERTIES OF CERTAIN HECKE ALGEBRAS. Richard Taylor y Andrew Wiles en *Annals of Mathematics*, vol. 141, n.º 3, páginas 553-572; mayo 1995.

NOTES ON FERMAT'S LAST THEOREM. A. J. van der Poorten. Wiley Interscience, 1996.

FERMAT'S ENIGMA. Simon Singh. Walker and Company, 1997.

Sasha Nemecek

MARIO MOLINA: Por la regeneración de la capa de ozono

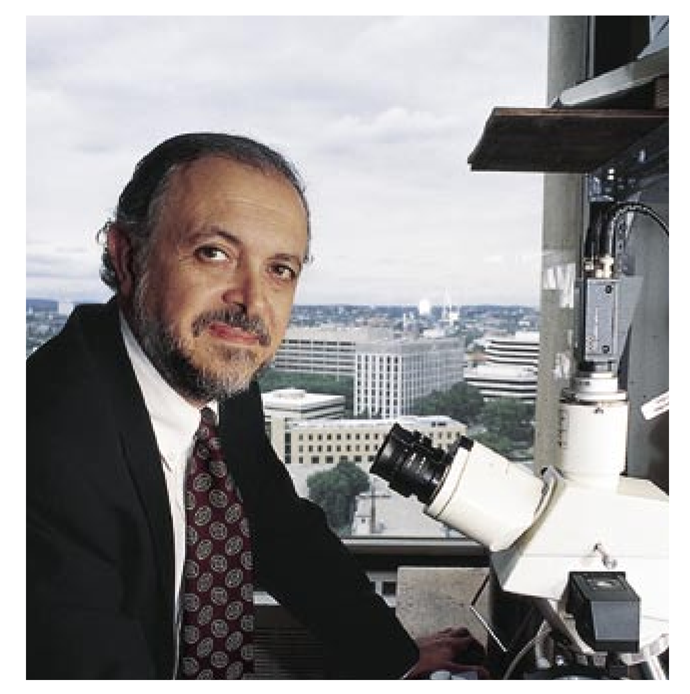
Mario Molina me conduce a través de su laboratorio del Instituto de Tecnología de Massachusetts, henchido de aparatos extraños. Se abre camino hasta una pequeña habitación, en la pared opuesta a la puerta de entrada. Allí me muestra uno de sus últimos cachivaches: un potente microscopio con una cámara de vídeo adosada. Lo han diseñado él y sus alumnos para observar la formación de las partículas de las nubes. Pese a su animosa descripción, me distraigo con las nubes que —sin necesidad de aumentos— cabalgan a lo lejos, cruzando un enorme ventanal. Lo último que hubiera imaginado es que Molina, quien sugirió que los halocarburos (CFC) destruían la capa de ozono, a 20 kilómetros por encima de nuestras cabezas, empleara un microscopio para estudiar las inmensidades de la atmósfera.

Pero dentro de los confines de su laboratorio, este premio Nobel ha visto muchas cosas, y bastantes de ellas preocupantes. No suele caer en prontos alarmistas. "Lejos de mí anunciar el fin del mundo", dice con una sonrisa, pero en su voz serena se entrevé un dejo de seriedad. Cuando Molina y su colega F. Sherwood Rowland, de la Universidad de California en Irvine, anunciaron el descubrimiento relativo a los CFC en 1974, a mucha gente se les vino el cielo encima.

El daño contra la capa protectora de ozono, que resguarda la superficie de la Tierra de la dañina radiación ultravioleta, significaría un aumento de cánceres de piel, la pérdida de cosechas y la devastación de recursos naturales. Tan grande era la preocupación que, hace 10 años, los gobiernos prohibieron los CFC y firmaron el Acuerdo de Montreal sobre sustancias nocivas para la capa de ozono.

Este profeta incomprendido del mundo de la química se acercó a ella por placer lúdico. Desde niño mostró interés por la química. Sus padres, complacientes, le dejaron transformar uno de los cuartos de baño de su espaciosa casa de México en un laboratorio privado.

Tras pasar por un internado suizo y estudiar en Alemania y Francia, Molina llegó a la Universidad de California en Berkeley para doctorarse en química física. Corría el año 1968, y el campus hervía con las algaradas estudiantiles a raíz de la guerra de Vietnam. La época de Berkeley le abrió los ojos acerca de la importancia de la ciencia y la técnica para la sociedad. Sus años allí resultaron también decisivos para su vida familiar. Tuvo por compañera de doctorado a Luisa Tan, quien andando el tiempo se casaría con él. El proyecto de Molina era de corte académico: usar láseres para estudiar el comportamiento de las moléculas durante las reacciones químicas. Pero como la técnica láser puede utilizarse con fines militares, el trabajo no gozaba de las simpatías de los activistas estudiantiles.

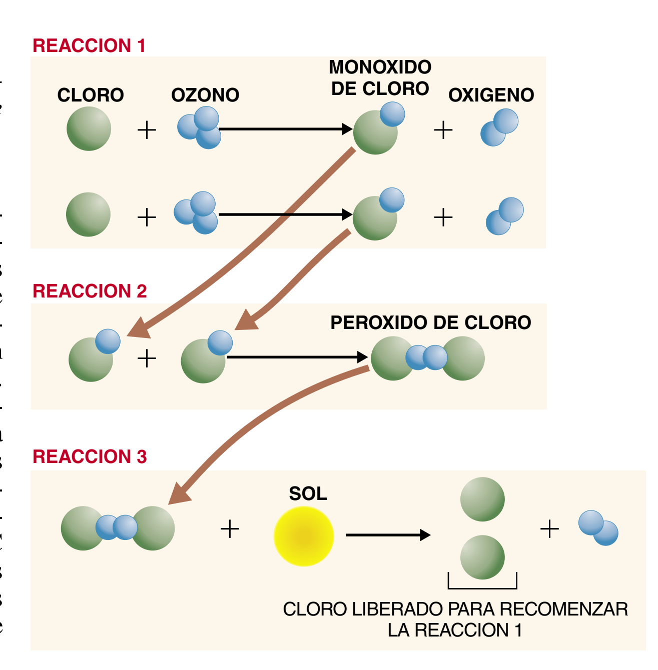


"Nos tuvimos que plantear estas cuestiones: ¿Por qué estamos haciendo esto? ¿Sería mejor gastar el dinero en otra cosa? ¿Es la ciencia buena o mala?" Filosofaban. "Llegué a la conclusión de que la ciencia en sí no es ni buena ni mala." La técnica, la aplicación de la ciencia, es otro cantar.

El deseo de comprender las implicaciones técnicas le llevó a estudiar los CFC durante una estancia postdoctoral con Rowland. "Todo lo que sabíamos era que estos compuestos industriales se mantenían sorprendentemente estables. Podíamos registrarlos en la atmósfera por todas partes", dice Molina. "Nos preguntábamos: ¿Qué les ocurre? ¿Hay motivos para preocuparse?"

Paradojas de la historia, desde hacía años los CFC venían gozando de aprecio. No parecía que hubiera motivos para preocuparse. En un congreso de 1930, el inventor de estos compuestos inhaló vapores de CFC y luego apagó con ellos una vela para demostrar que no eran ni tóxicos ni inflamables. En el curso del medio siglo siguiente se desarrolló una batería entera de técnicas nuevas fundadas en los CFC. Por citar algunas: neveras modernas, aire acondicionado para el automóvil y el hogar, vaporizadores, poliestireno y técnicas para limpiar microchips y componentes electrónicos.

La mayoría de las emisiones, como por ejemplo los gases de escape de los coches y de las chimeneas, nunca suben muy alto: los contaminantes reaccionan con el radical hidroxilo (OH^-), que actúa cual detergente atmosférico que vuelve solubles a los compuestos en el agua de lluvia. Molina comprobó cuán rápido reaccionarían los CFC con el radical hidroxilo. La respuesta: ni caso. "Parecía como si nada del más mínimo interés les fuera a ocurrir nunca."



El cloro destruye el ozono, pero no se consume en el proceso. Mario y Luisa Tan de Molina propusieron esta serie de reacciones para explicar cómo el CFC ha causado el agujero de ozono en la Antártida

Si bien los productos químicos no degradaban los CFC, quizá la luz del sol sí. Gracias a las observaciones en su laboratorio, Molina se dio cuenta de que en la estratosfera la radiación recibía la energía suficiente para romper las moléculas de CFC, desprendiendo, entre otras sustancias, átomos de cloro extremadamente reactivos, que, incluso en cantidades mínimas, pueden destruir el ozono actuando como catalizadores (es decir, sin que el cloro se gaste en el proceso de descomponer el ozono).

En junio de 1974 Rowland y Molina publicaron un artículo en *Nature* en el que proponían la vinculación de los CFC con la destrucción de la capa de ozono. Para su sorpresa, el artículo pasó casi inadvertido. Pocos meses más tarde, convocaron una rueda de prensa en un congreso de química. “Por fin, logramos atraer la atención del público”, recuerda.

Y tanto. Durante los años siguientes, las cartas sobre los CFC inundaron el Congreso de los Estados Unidos. El gobierno de la nación respondió con presteza, aprobando en 1977 disposiciones adicionales a la Ley del Aire en las que se pedía la regulación de cualquier sustancia “de la que se sospechara razonablemente que pudiera afectar la estratosfera”. Pronto quedó proscrito el uso de propulsores de CFC en los botes de aerosol. Las empresas químicas comenzaron a buscar sustitutos a los CFC; los más comunes fueron los hidroclorofluorocarburos (HCFC) y los hidrofluorocarburos (HFC). (Aunque los HCFC contribuyen al desgaste de la capa de ozono porque contienen cloro, no son tan dañinos como los CFC. Suelen desintegrarse antes de alcanzar la estratosfera. Los HFC no representan ningún peligro para la capa de ozono.)

Quizá convenga resaltar que actividad tan febril se acometió sin que nadie hubiera observado nunca merma de ozono estratosférico. El famoso agujero de la capa de ozono sobre la Antártida no se detectó hasta 1985. Molina alaba este “importante precedente en la aplicación de principios preventivos” y sugiere que la necesidad de “hacer algo incluso aunque no se disponga de pruebas [es] característico de los asuntos ambientales”.

Llevó más tiempo negociar un acuerdo internacional para regular los CFC. Pero en septiembre de 1987 más de dos docenas de países firmaron el Protocolo de Montreal. El tratado imponía una reducción inmediata de la producción y uso de los CFC. Disposiciones ulteriores han llevado a la eliminación total de los CFC en los países desarrollados en 1995 (los países en vías de desarrollo dispondrán de ellos hasta el 2010).

Aunque el Protocolo de Montreal se firmó después del descubrimiento del agujero de ozono en la Antártida, muchos científicos y legisladores todavía albergaban dudas, por aquel entonces, de que el agujero de la capa de ozono lo hubieran causado los CFC y que no se debiera a un ciclo natural. El mismo Molina recuerda que cuando oyó por primera vez las noticias sobre el agujero de ozono “no tenía ni idea” de si había que echarles la culpa a los CFC. Para probar la conexión entre los CFC y el agujero de ozono, Molina y su esposa propusieron en 1987 una serie de reacciones químicas que las mediciones confirmaron en 1991.

Eso satisfizo a la mayoría de los expertos de la ciencia y de las leyes, aunque aún quedan algunos críticos. Ya en 1995 —irónicamente, el mismo año en que Molina ganó el premio Nobel, compartido con Rowland y Paul J. Crutzen, del Instituto Max Planck de Química en Mainz— el Congreso de los Estados Unidos dedicó varias sesiones a la discusión sobre la naturaleza del agujero de ozono y la implicación de los CFC. El estado de Arizona declaró inválido el Protocolo de Montreal en su territorio. La paciencia de Molina parece acabarse con estas sugerencias. “Se puede ir a la estratosfera y ver cuánto cloro hay y convencerse uno mismo de que viene de los CFC”, dice, subiendo la voz.

En la comunidad científica, el problema del ozono esta básicamente solventado. Las dificultades afectan ahora a la ejecución del Protocolo de Montreal. (El último quebradero de cabeza: un pujante mercado negro de CFC.) Molina y su grupo han cambiado también, investigando un amplio conjunto de reacciones que ocurren en la atmósfera, entre ellas las que intervienen en la contaminación del aire urbano. Y Molina se pasa ahora menos tiempo en el laboratorio y más hablando a los funcionarios gubernamentales sobre cuestiones de leyes. En 1994 el presidente Clinton le nombró consejero de ciencia y tecnología.

Molina también anima a los estudiantes de los países en vías de desarrollo, en particular de Iberoamérica, a que se dediquen a las ciencias ambientales. (El es el primer mexicano-americano en ganar un premio Nobel, y el primero nacido en México que lo obtiene en ciencias.) Parte del dinero del galardón lo ha destinado a la creación de una beca para alumnos hispanoamericanos en los Estados Unidos. Dados los problemas ambientales a los que han de hacer frente las naciones en vías de desarrollo, entre los que se cuentan la deforestación, la desertización y la rampante contaminación del agua y del aire, le parece crucial contar con la gente de estos países a la hora de idear soluciones.

La ciudad natal de Molina, ahogada por el humo, ofrece un ejemplo patético. “Cuando yo era niño y vivía en México, la contaminación no constituía ningún problema”, recuerda. Pero la situación se ha subvertido en los 50 últimos años. Molina encuentra desconcertante que no se haga más por combatir la contaminación en las ciudades, mucho más patente en comparación con la presencia de CFC en la estratosfera. “Casi se puede ver y oler y respirar”, comenta.

Patología vegetal

Amarillamiento letal del cocotero

Entre las patologías que pueden sufrir las palmas, ninguna tan devastadora como el amarillamiento letal. Afecta a más de 30 especies. Por las informaciones que nos han llegado, sabemos que ya en el siglo pasado se extendía por la región del Caribe en Cuba, Jamaica y las Islas Caimán. En nuestro siglo, ha dejado su impronta dañina en Cuba, Jamaica, Estados Unidos (Florida y Texas), República Dominicana, Haití, Bahamas, México, Belice y Honduras.

El efecto del amarillamiento letal ha sido más notorio en el cocotero, palma abundante que caracteriza el paisaje de las regiones tropicales. Al no contarse con métodos eficaces de control del parásito y propagarse éste con suma celeridad, el Caribe ha sufrido en los últimos cincuenta años epidemias que han acabado con millones de palmas, lo que ha supuesto graves pérdidas económicas para cientos de miles de familias cuyos ingresos dependían directa o indirectamente del cocotero.

La infección no se limita al hemisferio americano. Africa ha padecido enfermedades de tipo amarillamiento letal en Gana, Togo, Nigeria, Camerún, Tanzania, Kenia y Mozambique. Igual que el amarillamiento letal, estas enfermedades también han destruido millones de palmas de cocotero con daño similar para múltiples hogares. Pese al interés de esas patologías asimiladas, aquí nos ceñiremos sobre todo al amarillamiento letal propiamente dicho.

En los años setenta se detectaron fitoplasmas en los vasos conductores del floema de palmas que mostraban síntomas de amarillamiento letal. (Se sabía ya que los fitoplasmas eran organismos del tipo de los micoplasmas.) Su presencia permitió confirmar la relación de causa a efecto que vinculaba tales microorganismos con la enfermedad.

Unas vez identificada la naturaleza del agente causal, y conocidos los patrones de dispersión del amarillamiento letal, se sospechó que el vector transmisor sería un insecto del suborden Homoptera. La mayoría de los vectores de enfermedades causadas por fitoplasmas pertenecen a ese taxón. Se realizaron trabajos de campo y se comprobó que, en las zonas afectadas por el amarillamiento de Florida y Jamaica, la única especie compartida era *Myndus crudus*, un insecto que se alimenta del floema de las palmas.

La implicación de *M. crudus* en la transmisión del amarillamiento letal viene respaldada por pruebas



1. Una plantación de cocotero afectada por el amarillamiento letal en Yucatán, México. (Fototeca de CICY)



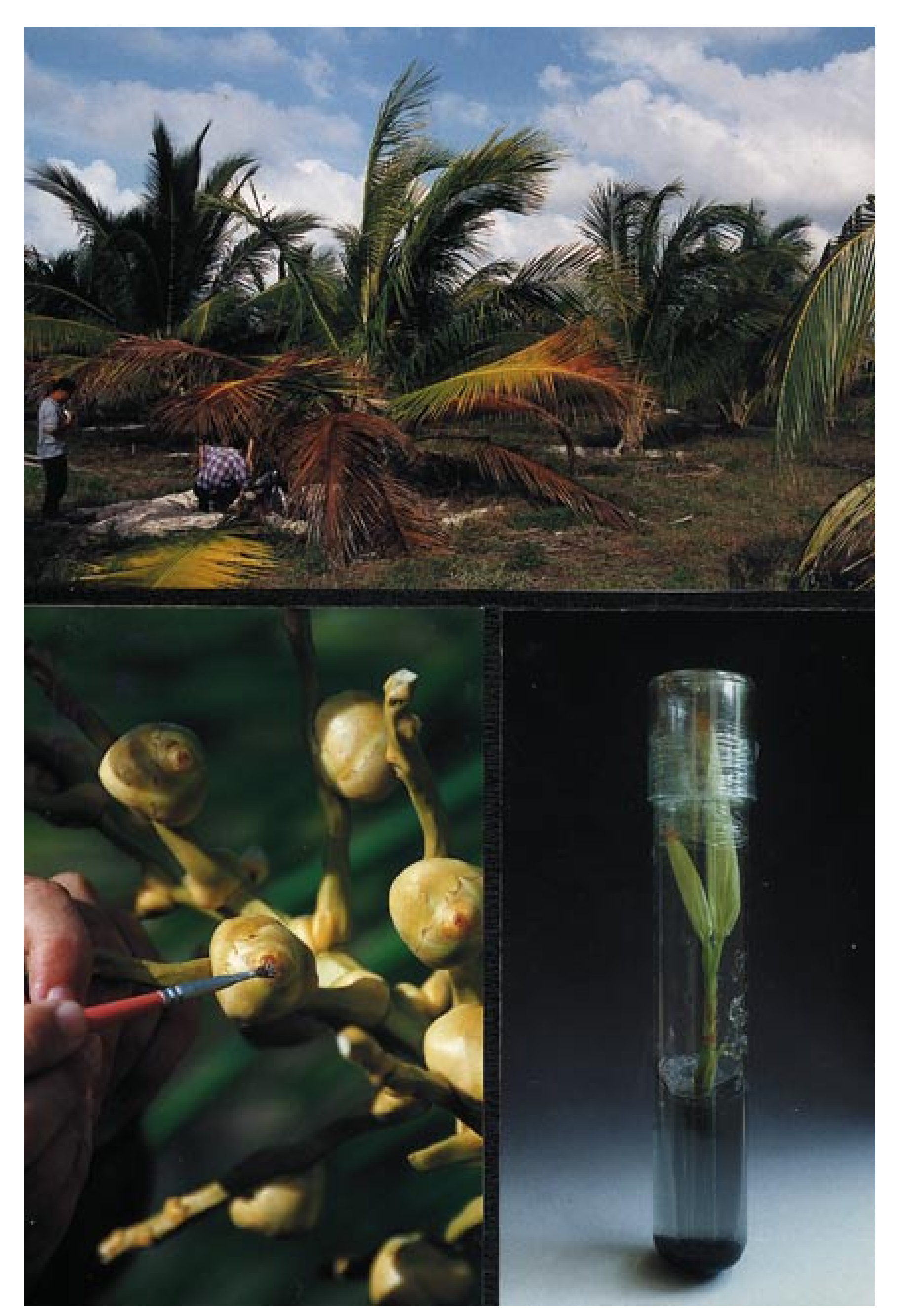
2. Síntomas progresivos del amarillamiento letal en cocotero. Arriba: caída de frutos y necrosis de las inflorescencias. Abajo: amarillamiento de la parte inferior del follaje, de la parte superior y troncos desnudos después de perder el follaje. (Fototeca de CICY)

adicionales. Según se ha visto, la población de *M. crudus* resulta hasta cerca de 40 veces mayor en las zonas afectadas por el fitoplasma que en las zonas exentas. También se ha observado que la velocidad de dispersión de la enfermedad se redujo en las zonas donde se atacó con insecticida las poblaciones de *M. crudus*. Por fin, en condiciones controladas, *M. crudus* ha transmitido el amarillamiento letal a palmas de diferentes especies, detectándose la presencia del patógeno en los tejidos del insecto.

La dispersión del amarillamiento letal se produce a través de dos mecanismos: irradiación desde un centro y propagación a saltos. De acuerdo con el primer mecanismo, la enfermedad aparece en una o dos plantas y, desde ese punto de infección, se extiende local y aleatoriamente a palmas contiguas. En el segundo mecanismo, a la propagación por saltos le sigue la dispersión localizada. La distancia cubierta por estos saltos, favorecidos por vientos fuertes como los huracanes, abarca decenas de kilómetros. Ello significa que la enfermedad puede avanzar hasta 100 kilómetros al año. Así ha ocurrido en México y América Central.

El primer síntoma de la enfermedad en palmas maduras es la caída prematura del fruto, independientemente de su estado de desarrollo. Aparece luego la necrosis de las inflorescencias nuevas, que se manifiesta cuando la inflorescencia emerge de la espata. La primera inflorescencia afectada muestra necrosis parcial, pero conforme la enfermedad progresa las inflorescencias más recientes sufren una necrosis extensa. La mayoría de las flores, muertas en esas inflorescencias, no maduran en fruto.

El amarillamiento de las hojas comienza comúnmente después de que la necrosis se presenta en más de dos inflorescencias. Las primeras hojas en amarillarse son las más viejas y que están en la base del follaje. El amarillamiento asciende palma arriba y afecta a las hojas más jóvenes. Las hojas amarillas se oscurecen, se secan y mueren. Se supone que, entre la adquisición del patógeno y la aparición del primer síntoma, transcurren de 7 a 15 meses;



3. Herramientas empleadas en la lucha contra el amarillamiento letal: pruebas para la selección de germoplasma de cocotero resistente en Yucatán (arriba)*, producción de híbridos obtenidos mediante cruzamiento de variedades de cocotero selectas* (abajo, izquierda) *y búsqueda de nuevas técnicas de propagación, como lo es la propagación clonal* in vitro *a través de embriogénesis somática* (abajo, derecha). (*Fototeca de CICY*)

entre el primer síntoma y la muerte de la palma, de 3 a 6 meses.

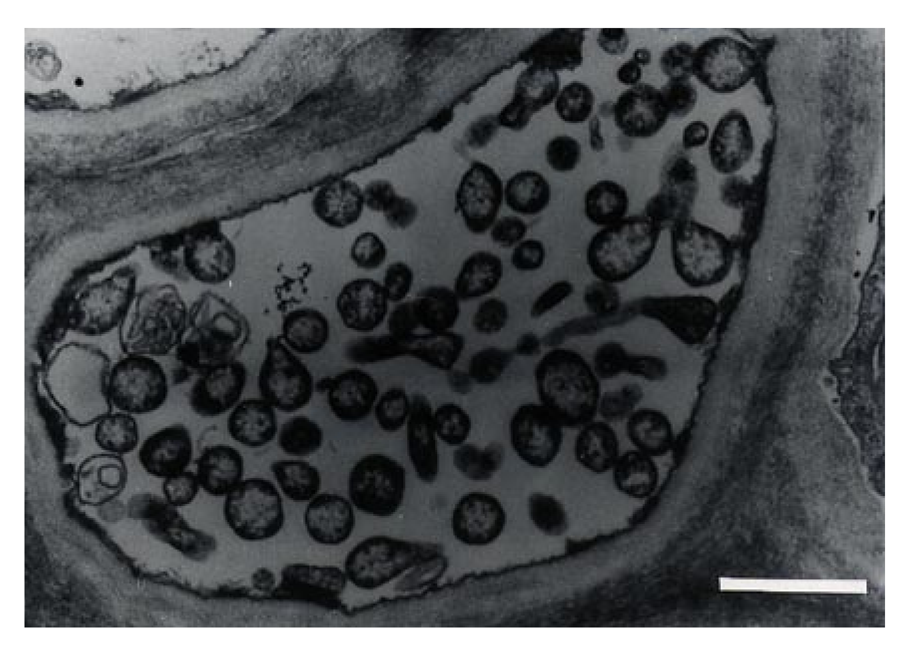
Lo mismo que en el amarillamiento letal, las "enfermedades del tipo del amarillamiento letal" (EAL) son causadas por fitoplasmas, se caracterizan por dispersarse por saltos y muestran una sintomatología parecida. Difieren, sin embargo, en la sensibilidad ante distintas variedades de cocotero y en la epidemiología; los fitoplasmas que causan el amarillamiento letal parecen divergir de los agentes de las EAL.

Tras decenios de investigación, seguimos sin métodos eficientes de control del vector y sin un tratamiento que cure permanentemente las palmas enfermas de amarillamiento letal o de EAL. Por lo que respecta a las EAL, podemos recurrir al empleo de antibióticos de la familia de las tetraciclinas; transcurridos algunos meses desde su aplicación, se observa la remisión de síntomas, pero el tratamiento deberá repetirse cada tres o cuatro meses, de lo contrario los síntomas reaparecen y finalmente la palma muere. Más eficaz resulta otra estrategia: sustitución de palmas sensibles por palmas resistentes. De los años cincuenta acá se han ido descubriendo, sobre todo en Jamaica, variedades con diferentes niveles de resistencia. Del cruzamiento entre ellas han resultado híbridos que combinan las mejores características de ambas. Tampoco hemos de olvidar medidas preventivas de cuarentena, que restrinjan el movimiento de material vegetal que represente riesgo en la dispersión de la enfermedad.

El daño devastador que en los años sesenta y setenta causó el amarillamiento letal en Jamaica y en Florida constituyó el acicate para los investigadores. De ese empeñó salió la identificación del agente causal y la elucidación de la forma de transmisión. Hubo más. En particular, los resultados que los investigadores europeos obtuvieron en Jamaica sobre evaluación de resistencia de variedades de cocotero de diferentes partes del mundo, así como sobre los híbridos creados a partir de las razas con mejores características. Uno de ellos, el Maypan (Enano Malayo Amarillo × Alto de Panamá), se ha convertido en el plantón más socorrido, gracias a sus excelentes características y su resistencia a los patógenos.

El amarillamiento letal apareció en México a finales de los setenta. Ante el riesgo de su dispersión hacia el resto de Iberoamérica, se incrementó la investigación, sobre todo, el apartado relativo a la resistencia de diferentes variedades de cocotero. Desde 1991 se vienen sometiendo a ensayo una veintena de variedades de cocotero procedentes de diferentes partes del país. Los resultados permiten ser optimistas. Se han observado bajos niveles de susceptibilidad en ciertas variedades, con las cuales ya se están obteniendo nuevos híbridos. Con ello se dispondrá de una mayor diversidad genética y podremos identificar los materiales que, por sus caracteres, resulten ser los idóneos para distintas condiciones ambientales.

La disponibilidad actual de palmas resistentes es muy baja comparada con la demanda creciente. Ese hiato se irá ensanchando con la difusión del amarillamiento letal y con el





4. Fitoplasmas (la barra equivale a 1 mm) causantes del amarillamiento letal en una célula del floema de una palma infectada (arriba). Myndus crudus*, un homóptero (la barra equivale a 2 mm) que transmite a los fitoplasmas causantes del amarillamiento letal* (abajo). (*Fotografías de N. Harrison, FLREC, Universidad de Florida*)

envejecimiento de las palmas de los países productores de cocotero. Desafortunadamente, el cocotero, que sólo puede propagarse por semilla, presenta un coeficiente de multiplicación muy bajo y un ciclo de reproducción muy largo. Por eso, la propagación, únicamente a través de semilla, de germoplasma selecto o mejorado sería insuficiente para cubrir su creciente demanda.

En busca de una solución se ha puesto la mirada en los métodos de la biotecnología. En particular, en la propagación clonal *in vitro* a través de la embriogénesis somática. En este sentido, se trabaja con ahínco en el desarrollo de protocolos eficientes para la propagación clonal del cocotero, con la participación de instituciones de Costa de Marfil, Filipinas, México, Alemania, Francia y Gran Bretaña. Estas investigaciones han generado avances importantes en el desarrollo de protocolos fiables para la regeneración del cocotero a partir de inflorescencias inmaduras y plúmulas.

Carlos Oropeza
Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY)
Mérida

Residuos peligrosos

Su gestión en España

La problemática ambiental y de recursos planteada por los residuos industriales en general, y los peligrosos en particular, proviene de las limitaciones de los procesos industriales. Tales procesos no alcanzan, en su desarrollo, un rendimiento del 100 % con respecto a las materias primas y energía que utilizan. Cierto es que los procesos naturales tampoco.

Junto a los productos con valor comercial, se generan corrientes secundarias residuales carentes de valor. Lógicamente, la planta responsable quiere desembarazarse de las mismas. Así, al no poder aprovecharlas ni darles una salida comercial, las destinan al abandono.

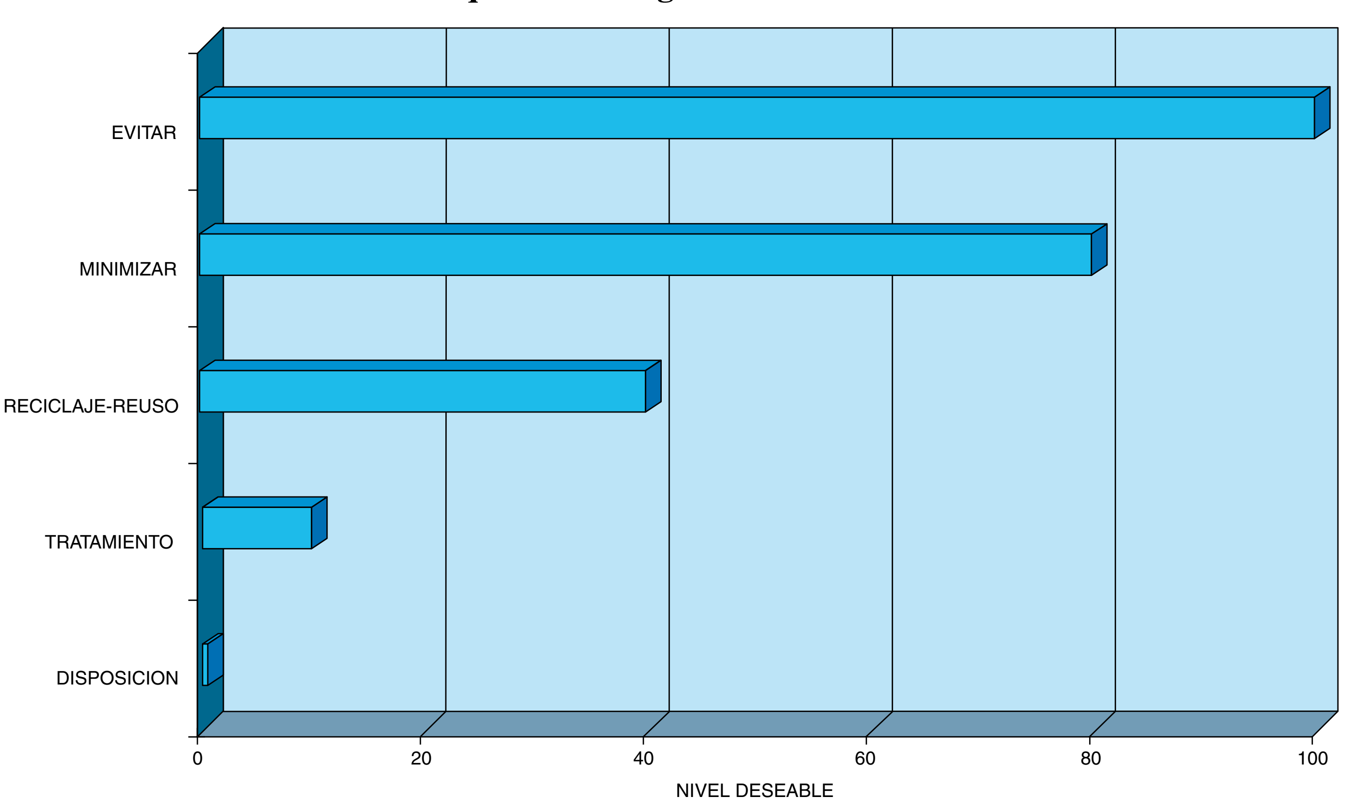
El potencial de riesgo intrínseco que comporta el residuo industrial para el entorno y la salud, no es mayor ni menor que los productos comerciales de características similares. Pero éstos, dado que poseen valor, reciben las atenciones necesarias para que dicho riesgo no se materialice, cosa que no sucede con los residuos industriales.

La gestión de los residuos peligrosos ha experimentado una evolución positiva en los tres últimos lustros en España. A principios de los años ochenta, ni las grandes industrias ni la administración los consideraban un problema merecedor de especial cuidado. Hoy, sin embargo, nadie discute la jerarquización de su gestión. Se ha pasado, pues, de una actitud de inhibición o de pasividad a una situación de preocupación creciente, con una parte del tejido industrial interesada en afrontar su solución y otra parte que permanece menos dispuesta.

Ese cambio de actitud se debe, en buena medida, a la incorporación de España a la Comunidad Europea en 1986. Al no establecerse para los temas de medio ambiente ningún período transitorio, nuestra nación se vio obligada a adoptar las disposiciones europeas a su derecho interno. En coherencia con esa imposición, desde 1986 la Administración Española ha ido creando un cuerpo de normas legales que acomodaran nuestra legislación a las directivas comunitarias.

En ese contexto se aprobó la Ley 20/86 básica sobre Residuos Tóxicos

Jerarquías en la gestión de residuos



y Peligrosos, cuyo reglamento se desarrolló mediante el Real Decreto 833/88. Los principios contenidos en estos textos legales son similares a los existentes en el resto de los países de la Unión Europea. Puede decirse que la legislación de la Unión sobre residuos peligrosos está ya recogida en el derecho español.

Aunque el número de instalaciones para el tratamiento de los residuos peligrosos ha crecido, la capacidad varía de una región a otra. Algunas empresas tienen sus propias instalaciones fuera de fábrica, sobre todo vertederos controlados. No existe todavía en España ningún incinerador público de residuos industriales de propósito general, aunque sí varios en instalaciones privadas. Antaño se recurría a la incineración en mar, pero esa práctica terminó con la firma del Convenio de Oslo. Cabe esperar que pronto entre en funcionamiento la instalación proyectada para Tarragona.



Planta integral de tratamiento de residuos peligrosos

Pese a que el sector industrial español responde con cierta lentitud al tratamiento de los residuos que genera, se están formando empresas de tratamiento de residuos peligrosos, unas nacionales, otras con participación extrajera y otras enteramente foráneas.

Desde 1983 funciona de forma continuada una bolsa de residuos, denominada BODEREQ, gestionada por la Federación Empresarial de la Industria Química Española (FEIQUE), con un número importante de intercambios. Las Cámaras de Comercio han puesto otra en funcionamiento, especialmente activa.

Desde los años setenta operan en España instalaciones de reciclaje y recuperación de disolventes. Pero carecemos de plantas para la eliminación de PCB (siglas de policloruro de bifenilo); ante esa deficiencia, hay dos empresas que se hacen cargo de los mismos para su exportación a Inglaterra y Francia. Pese al enorme interés de la gestión de su tratamiento, no se habla mucho del amianto, siendo así que habrá que recuperarlo de muchos edificios, en particular de estructuras metálicas aisladas con él. Otro ámbito que

espera abordarse es el de los suelos contaminados.

La aceptación por parte de la población de las instalaciones de gestión de residuos peligrosos continúa siendo una asignatura pendiente de nuestra sociedad. El problema está cargado de emotividad. No es que los residuos sean peligrosos y tóxicos, es que “yo no quiero en mi casa lo que los demás no quieren en la suya”.

José M. Baldasano
Universidad Politécnica de Cataluña Premio Rey Jaime I de Medio Ambiente 1997

Cuenca mediterránea

Los deltas

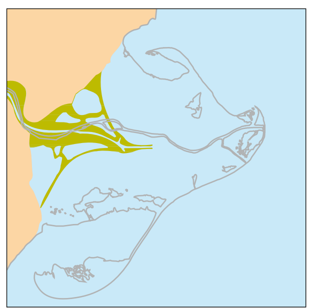
El proyecto MEDDELT nació en 1994 con el objetivo de estudiar el impacto del cambio climático en los deltas del noroeste mediterráneo, en particular la incidencia de la subida relativa del nivel del mar en los deltas del Ebro, Rhône y Po. Partió la iniciativa del departamento de ecología de la Universidad de Barcelona y del laboratorio de ingeniería marítima de la Universidad Politécnica de Cataluña. En su desarrollo ha contado con la colaboración de nueve centros de investigación de España, Francia, Italia y Holanda. Dentro del carácter multidisciplinar del trabajo, se evaluaron los efectos geológicos, ecológicos y socioeconómicos de ese ascenso del nivel del mar.

La subida relativa del nivel del mar es la suma de la subida eustática, causada por el calentamiento climático, y la subsidencia de la llanura deltaica, causada por la compactación de los sedimentos y por el hundimiento tectónico. Los tres deltas estudiados (y la mayoría de los deltas del planeta) han de hacer frente a un mismo problema: la intervención humana, tendente a convertir en rígidos estos sistemas tan dinámicos y a aislarlos de los procesos fluviales y marinos, ha reducido drásticamente las entradas de sedimento en la llanura deltaica, necesarias para compensar el fenómeno de la subsidencia y evitar así su pérdida progresiva de elevación.

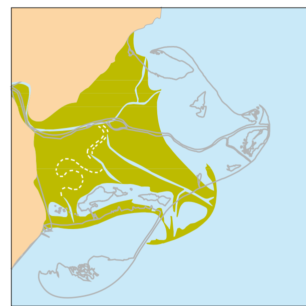
En efecto, la construcción de embalses en la cuenca y de diques fluviales y costeros en el delta, así como la fragmentación física e hidrológica de la llanura deltaica por medio de carreteras, canales, parcelación agrícola, etc., impiden la sedimentación asociada a fenómenos pulsantes e irregulares como las crecidas de los ríos y las tormentas marinas. Dichos fenómenos, aunque percibidos como catastróficos para el hombre, son el elemento clave para la viabilidad física, ecológica y socioeconómica de los deltas a largo plazo.

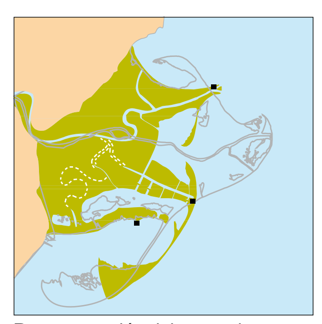
Los problemas del déficit sedimentario se agravan con la subida eustática del nivel del mar, que implica en definitiva una mayor demanda de sedimento arenoso para la costa deltaica y de sedimento limoso para la llanura deltaica. Para garantizar la viabilidad de los deltas debemos, pues, mantener tanto la superficie como la elevación, asegurando un aporte suficiente de sedimentos al sistema. Si no se consigue dicho objetivo, se desencadena un progresivo proceso de degradación física y ecológica de los deltas, con consecuencias socioeconómicas negativas, que ya se dejan sentir en los tres deltas.

EVOLUCION DEL ULTIMO DESARROLLO DELTAICO DEL EBRO DURANTE LOS ULTIMOS 4000 AÑOS
Autor: Antoni Canicio (geólogo)


Configuración aproximada hacia finales del último ascenso eustático, hace unos 4000 años

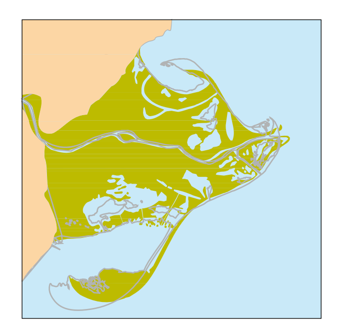

Configuración aproximada entre el siglo VI-X


Configuración aproximada entre el siglo X-XII


Representación del mapa de Mercator-Hondius (1580)
▪ Torres de defensa


Representación de 1700 aproximadamente


Representación del mapa de Miguel Marín (1749)
▪ Torres de defensa


Delta del Ebro 1860


Delta del Ebro 1923

En definitiva, la clave para asegurar la compatibilidad entre los asentamientos humanos y el mantenimiento del sistema deltaico es una ordenación y gestión integrada del territorio que permita, con la ayuda de diversas técnicas de ingeniería ecológica, mantener de forma controlada los procesos hidrológicos, sedimentológicos y biológicos esenciales.

Se han investigado de manera pormenorizada los siguientes aspectos: topografía y batimetría, evolución geomorfológica, evaluación de los flujos de agua y sedimento, evaluación de las tasas de sedimentación y de subsidencia en diversos puntos de la llanura deltaica, evaluación de la producción primaria y la descomposición de las comunidades vegetales, evaluación del transporte costero de sedimento, definición del clima de oleaje, mareas y régimen de corrientes marinas, balance sedimentario del frente costero y descripción de los usos del territorio y actividades socioeconómicas.

Con los datos obtenidos se han construido tres modelos diferentes de simulación, para evaluar la evolución futura del sistema bajo diversos escenarios: un modelo sobre la elevación del suelo, un modelo sobre la evolución de la línea de costa y un modelo coste-beneficio de las variables socioeconómicas. Por último, se han esbozado posibles alternativas de gestión viable de los sistemas deltaicos.

Los resultados más destacados se sintetizan como sigue. Aproximadamente un 40 % de los deltas del Ebro y del Rhône tienen una elevación menor a 50 cm sobre el nivel del mar (con algunas zonas bajo el nivel del mar) y un 90 % del delta del Po está bajo el nivel del mar (con zonas extensas a –2 y –3 m). El caso extremo del Po se explica por una fuerte subsidencia ocurrida en los años cincuenta y sesenta a causa de la extracción de agua y metano del subsuelo. Las tasas actuales de subsidencia oscilan entre 1 y 8 mm/año en función de la zona estudiada, con valores dominantes de 2-3 mm/año. Puesto que la tasa actual de subida eustática del nivel del mar se estima en unos 1,5 mm/año, la pérdida de elevación de la llanura deltaica se cifra en unos 4 mm/año en términos generales. Sin embargo, en un escenario futuro de aceleración de la subida eustática del nivel del mar, dichas tasas se pueden ver incrementadas.

La previsión del Panel de Expertos sobre el Cambio Climático es que el nivel del mar puede subir unos 50 cm durante el próximo siglo. Así, en el caso del delta del Ebro, donde se ha estimado una subsidencia media de 2 mm/año, la elevación relativa del nivel del mar al final del próximo siglo puede ser de 70 cm, quedando más de la mitad del delta por debajo del nivel del mar. Por otra parte, las tasas de sedimentación evaluadas en diversos ambientes deltaicos indican que solamente las zonas naturales condicionadas por los procesos fluviales y marinos presentan valores iguales o superiores a la tasa de subida relativa del nivel del mar. Dichas zonas se limitan al entorno inmediato de la desembocadura y a algunas zonas de marismas donde la contribución de la materia orgánica al proceso de formación del suelo es importante.

Para conocer el papel de la materia orgánica en la conformación del terreno se ha abordado la producción primaria de la vegetación, su tasa de descomposición en el suelo y el contenido de materia orgánica del sedimento. Los resultados indican que el papel de la vegetación es clave para el mantenimiento de la elevación del suelo en las zonas naturales, no sólo por la contribución directa de la materia orgánica producida, sino por el papel de consolidación del suelo y de trampa de sedimentos que también desempeña.

En el caso del delta del Ebro, se ha elaborado, asimismo, la primera secuencia evolutiva fiable de los últimos 4000 años, a partir de un análisis muy detallado de la información cartográfica y geológica disponible, rompiendo el mito de su extrema juventud en relación con otros deltas.

CARLES IBÁÑEZ
Departamento de Ecología,
Universidad de Barcelona

Pilas de combustible de membrana polimérica

Aplicación al transporte

Las pilas de combustible son sistemas que convierten directamente la energía de un combustible (hidrógeno por lo común) en electricidad por métodos electroquímicos. Hallan en el transporte una de sus principales aplicaciones. Chrysler, General Motors, Ford, Daimler-Benz, Ballard, Nissan, Renault y Volvo están ya investigando en este campo.

La sustitución del motor de combustión habitual por una pila de combustible supondría la reducción en la utilización del combustible por kilómetro en 1/3, con una eficacia del 50 %-60 % frente al 20 % de los tradicionales. Se evitaría así la dependencia de los combustibles fósiles y con agua como único subproducto, al mismo tiempo que se reducirían, casi del todo, los ruidos y las emisiones de CO_2, causante del efecto invernadero, y de otros contaminantes. La alimentación constante de combustible ahorraría los períodos de recarga de las baterías, razón fundamental por la que los vehículos eléctricos no tienen fácil la entrada de las baterías en el mercado del transporte.

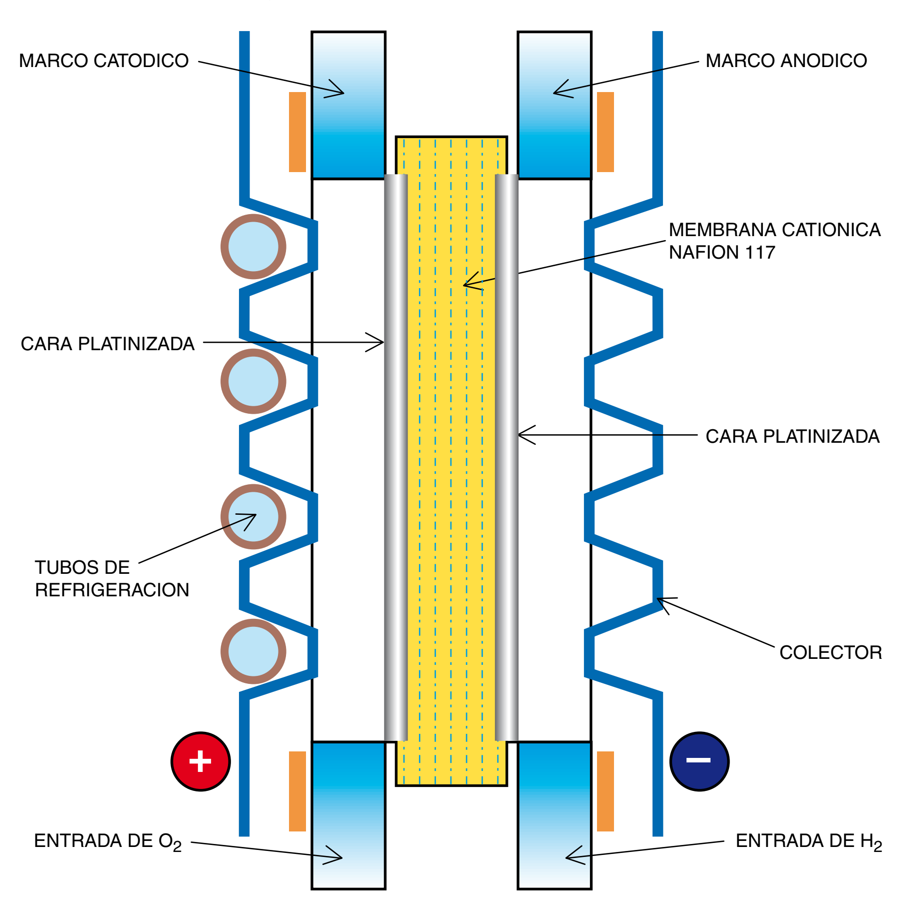
¿Cómo funciona una pila de combustible? Cuando un elemento se oxida (se combina con oxígeno) en presencia de un catalizador se produce energía; así, al introducir el hidrógeno en una cámara aislada una de cuyas paredes es una sustancia conductora iónica (que dará nombre al tipo de pila: fosfórico, carbonatos fundidos, óxido sólido o polímero) se descompondrá en un protón (H^+) y un electrón; esta partícula se recoge en un conductor eléctrico, causando un potencial negativo. En el otro lado de la membrana, el oxígeno reaccionará con el protón para producir agua; necesita para ello el anterior electrón. Se generará, por tanto, energía eléctrica continua teniendo como subproductos agua y energía térmica.

Cada celda consta, pues, de un cátodo y un ánodo porosos de un espesor de 10 micras depositados a ambos lados de un conductor iónico de 50-250 micras de espesor. Los electrodos proporcionan una diferencia de potencial próxima a un volt y una intensidad de corriente directamente relacionada con la superficie de la celda y de las características de los materiales utilizados. La conexión de múltiples celdas en serie por medio de un conductor electrónico constituye un apilamiento, o "Stack".

De los diversos tipos de pilas de combustible existentes merecen destacarse las pilas de combustible de polímero sólido (PEM). Gracias a su alta eficacia, elevada densidad de corriente, baja temperatura de operación, electrolito no volátil y resistencia a la corrosión, resultan perfectas para su utilización en el vehículo eléctrico. Ello obliga, sin embargo, a mejorar la

técnica existente con el fin de obtener una densidad de corriente suficiente para cumplir las especificaciones de potencia necesarias del vehículo, dentro del espacio disponible. Por otro lado, las innovaciones a introducir deben competir en costos con el motor tradicional, tiempos de puesta en marcha y parada cortos y rápida respuesta a los cambios de demanda, sin pérdida de seguridad y fiabilidad.

Las membranas poliméricas de las pilas de combustible deben tener elevada conductividad protónica, escasa o nula permeabilidad al hidrógeno y el oxígeno moleculares y resistencia a la corrosión en ambientes oxidantes y reductores a temperaturas próximas a 130 ºC. Actualmente se utilizan polímeros fluorosulfonados que presentan una estructura central de politetrafluoretileno, con una ramificación vinílica fluorada unida a la estructura central por medio de una unión éter y con un grupo sulfónico terminal para suministrar la capacidad de intercambio catiónico.

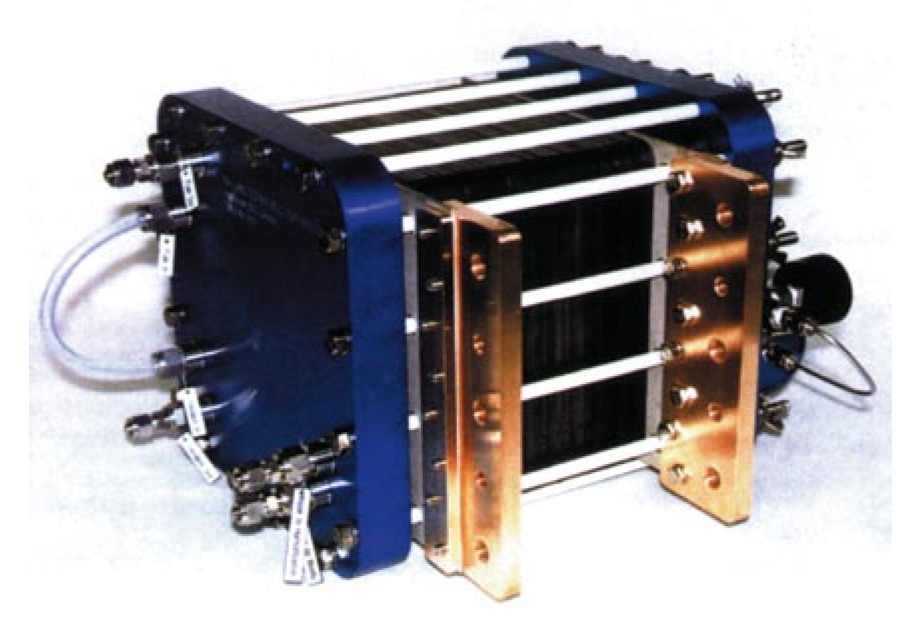


Las pilas de combustible de tipo polimérico trabajan en un rango de temperatura de 80-100 ºC, lo que implica que, para que las reacciones de oxidación y reducción del hidrógeno y del oxígeno tengan lugar a velocidades adecuadas en el ánodo y el cátodo respectivamente, se requiere la presencia de un catalizador. Puede emplearse platino en soporte de negro de carbón a unas cargas de 0,4 mg/cm^2. Con el fin de reducir la resistencia a la transferencia de carga y aumentar el rendimiento del sistema, se exige un contacto perfecto entre la membrana polimérica y la lámina de catalizador. La utilización de un catalizador implica, a su vez, la eliminación del monóxido de carbono en la corriente de alimentación.

Aunque las pilas de combustible presentan unas ventajas considerables en la generación de energía eléctrica y en su aplicación al transporte, antes de pensar en su comercialización habrá que avanzar más en el camino de la optimización de su funcionamiento y en la reducción de costes de fabricación. La investigación en este campo se dirige a la utilización de catalizadores con mayor tolerancia a los contaminantes (monóxido de carbono, compuestos de azufre, etc.), membranas con mayor densidad de corriente y a la reducción de costes con la utilización de menores cargas de catalizador y membranas poliméricas más económicas.

Para que las pilas de combustible sean una realidad en su aplicación al transporte es necesario alcanzar, entre otros, los parámetros siguientes: densidad de potencia 0,4-1 kilowatt/litro, eficacia 50-60 %, vida media 6000 horas, tiempo de encendido 5-10 segundos, coste del kilowatt instalado de 15.000 a 20.000 pesetas por kilowatt.

F. Cerisola, T. Hernández,
M. J. Marcos y M. J. Escudero
Depto. Combustibles Fósiles.
CIEMAT,
Madrid



Stack de pila de combustible polimérica con aplicación a tracción

Mamografías

¿Son recomendables en las mujeres jóvenes?

El cáncer de mama, la neoplasia maligna más frecuente en las mujeres, ocasiona en España un número de fallecimientos mayor que ninguna otra. En la mama, el cáncer suele presentarse a partir de la edad media de la vida —sólo alrededor de un 3 % de los casos en mujeres de menos de 35 años—, en forma de nódulo o tumoración, que, aun con la técnica más depurada, puede a veces escapar a la palpación.



Mamografía en la que se observa un nódulo mamario (flecha) *de 2 cm de diámetro, que fue diagnosticado de cáncer en una mujer de 29 años*

Pero no todo nódulo palpable de la mama es un cáncer. En la mujer joven sobre todo, lo más probable es que un nódulo palpable corresponda a un quiste o, si tiene consistencia sólida, a una neoplasia benigna, tal como un fibroadenoma mamario. Así pues, la relativa rareza del cáncer de mama en las mujeres jóvenes constituye un factor añadido a la dificultad intrínseca del diagnóstico de esta enfermedad.

Sin negar la importancia de la autoexploración y de la anamnesis y exploración llevadas a cabo por el médico, el diagnóstico de ese tipo de cáncer se basa fundamentalmente en la mamografía. Esta técnica radiológica permite detectar nódulos tumorales de pequeño tamaño, incluso de 3 milímetros de diámetro, imposibles de palpar. Una vez detectado un nódulo sospechoso, la citología aspirativa o la biopsia quirúrgica posibilitan que el anatomopatólogo confirme el diagnóstico.

Pero no es recomendable la mamografía para el estudio de mujeres menores de 35 años asintomáticas. Se está de acuerdo en que los programas de cribado (*screening*) para la detección precoz del cáncer de mama mediante mamografía no deben incluir a mujeres menores de 40 años, salvo que tengan antecedentes familiares. La razón es muy sencilla: en este grupo de edad, el bajo rendimiento no justifica los gastos en recursos humanos y materiales, ni los efectos perjudiciales físicos y psicológicos que tales programas generan.

Desde hace 10 años se viene empleando la ecografía o ultrasonografía, procedimiento de diagnóstico por imagen que complementa a la mamografía y que en las mujeres jóvenes suele utilizarse como primer método diagnóstico. Aunque la ecografía mamaria permite discernir si un nódulo es quístico o sólido, no sirve, sin embargo, para diferenciar un nódulo benigno de otro maligno.

Superada la renuencia inicial a efectuar una mamografía en una mujer joven, hay que enfrentarse a una dificultad mayor: su interpretación diagnóstica. El patrón radiológico denso, más frecuente en la mamografía de la mujer joven, dificulta la detección de nódulos en la lectura mamográfica. Por ello, nuestro grupo decidió analizar el proceso diagnóstico en todos los cánceres de mama diagnosticados en el Hospital Nuestra Señora del Pino de Las Palmas a lo largo de 14 años.

Nuestra principal conclusión es que la mamografía es adecuada para el diagnóstico del cáncer, incluso en las mujeres más jóvenes, por lo que no debe dudarse en utilizarla a cualquier edad en caso de sospecha clínica. Cierto es que la mayoría de los cánceres de mama en nuestra serie de 53 mujeres jóvenes se encontraban en estadios clínicamente avanzados, puesto que se habían diagnosticado a partir de la palpación de un nódulo y no por la detección mamográfica de un nódulo asintomático.

El alto coste de la resonancia magnética y la larga duración de la exploración hace que no sea útil para el cribado, pero sí justifica su utilización en los casos de difícil diagnóstico. La autoexploración reglada y periódica es, hoy por hoy, el único método que permite detectar más precozmente los tumores malignos y benignos de la mama en la mujer joven.

MARGARITA ASENJO
Universidad de Las Palmas
BASILIO J. ANÍA
Hospital Nuestra Señora del Pino
de Las Palmas

Cromosomas sexuales

La región pseudoautosómica

La diferenciación sexual está determinada cromosómicamente en los mamíferos. Significa ello que los animales que carecen de cromosoma Y se desarrollan como hembras, cuya dotación de cromosomas sexuales es normalmente XX. Por el contrario, los mamíferos de dotación XY van a expresar genes del Y necesarios para el desarrollo gonadal como testículo, y, consecuentemente se diferencian como machos.

Los mamíferos somos diploides, con dos copias de cada cromosoma, uno de origen materno y otro paterno. La formación de gametos haploides (óvulos y espermatozoides) requiere un reparto equilibrado de información genética que tiene lugar mediante el

proceso conocido como meiosis. Una fase crucial de la meiosis consiste en el apareamiento preciso de cada cromosoma con su homólogo.

Durante la meiosis femenina cada pareja de cromosomas (tanto los autosomas como los cromosomas sexuales, XX) está formada por dos cromosomas esencialemente iguales (homólogos). Por el contrario, en la meiosis masculina sólo los autosomas forman parejas homólogas, mientras que los cromosomas sexuales (XY) son muy diferentes en tamaño y contenido génico en la actualidad. Estudios evolutivos han llevado a la conclusión de que el cromosoma Y procede de un cromosoma primitivo similar a X.

Si partimos de un par de cromosomas homólogos, iguales por tanto en su estructura citológica, en que uno de ellos se especializa en programar la diferenciación sexual masculina (el futuro Y), la naturaleza ha de solucionar entonces una primera dificultad. ¿Cuál?

Los nuevos cromosomas sexuales deben diferir entre sí lo suficiente como para evitar el intercambio de material genético, que pudiese afectar al factor de diferenciación testicular (TDF) del cromosoma Y. Evolucionando hacia cromosomas sexuales heteromórficos (X e Y), que divergen en tamaño y contenido génico, se ha garantizado que el gen SRY (que codifica el factor de diferenciación testicular) no pase del cromosoma Y al X durante la recombinación meiótica, algo que daría lugar a individuos "reversos sexuales" (hembras XY o machos XX) en la siguiente generación.

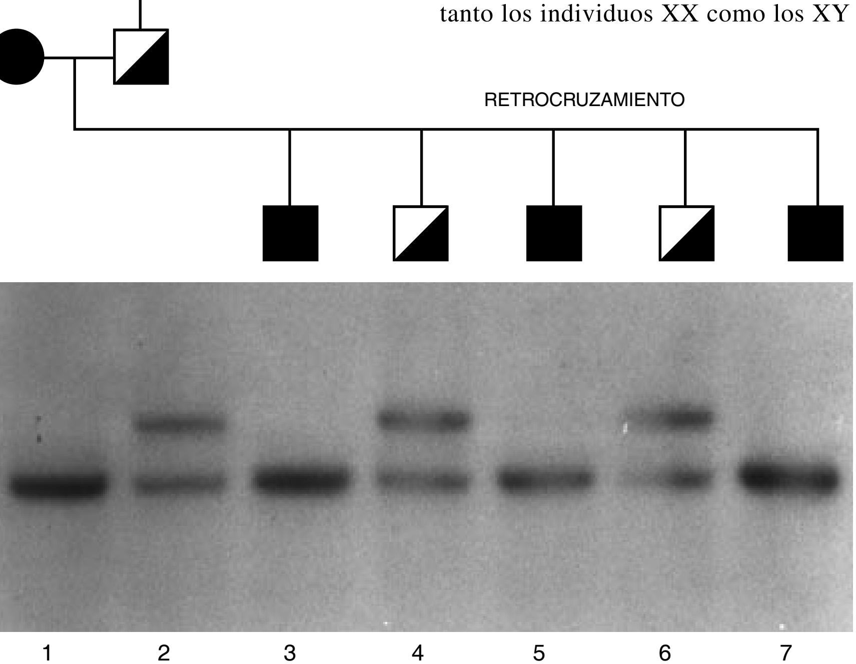
Esta evolución cromosómica entraría en conflicto con la exigencia de que se den secuencias de ADN homólogas entre los miembros de un par cromosómico que permita el apareamiento, recombinación y segregación apropiada de cada cromosoma sexual durante la meiosis masculina. Esta es la función de la región pseudoautosómica (PAR) de los cromosomas sexuales. Dicha región abarca la porción de total homología X-Y donde ocurre al menos un entrecruzamiento durante la espermatogénesis. Decimos que una región del X tiene homología total con una del Y cuando las secuencias de ADN son idénticas en esa zona de ambos cromosomas. Aunque en el ser humano existe una segunda PAR en el extremo distal del brazo largo de los cromosomas sexuales, el principal segmento de total homología X-Y es la PAR del brazo corto de los cromosomas sexuales humanos y la región equivalente a ésta en otros mamíferos.

Nuestro trabajo se ha centrado en la región pseudoartosómica murina. El patrón de herencia de genes localizados en esta región se asemeja al de genes autosómicos; ello significa que no existe un ligamiento completo con el sexo, a pesar de su localización en los cromosomas sexuales. Vemos confirmado ese fenómeno resultante de la recombinación entre secuencias del X e Y en el análisis de pedigríes.

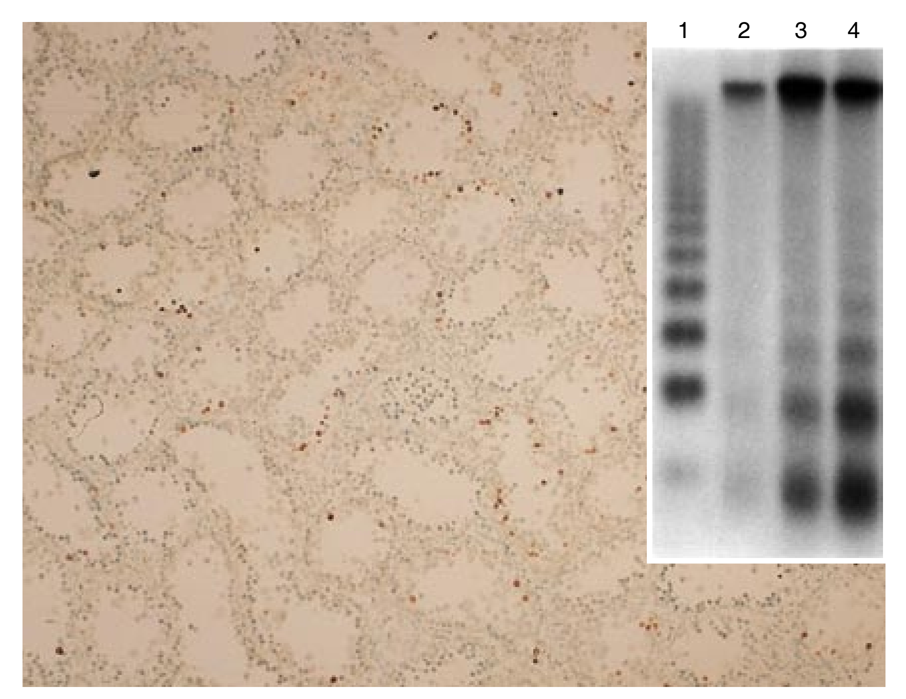
Una segunda cuestión sorprendente que plantea el diseño cromosómico del sexo en mamíferos estriba en la diferencia de dosis de genes, en el cromosoma X, entre hembras (XX) y machos (XY). Para alcanzar una equivalencia cuantitativa en la expresión de la mayoría de los genes del cromosoma X, los mamíferos establecieron un mecanismo de regulación transcripcional peculiar: nada menos que la inactivación de dicho cromosoma. Este fenómeno, que acontece en las primeras etapas del desarrollo, permite que sólo sea activo un cromosoma X por célula, alcanzándose una compensación de dosis génica entre individuos XX y XY. En virtud de ello, el nivel de expresión impuesto a los genes localizados en el cromosoma X resulta especial, ya que, en el dominio celular, machos y hembras son funcionalmente hemizigóticos.

Tal imposición impidió, en el curso de la evolución de los mamíferos, que los genes del cromosoma X se movieran libremente por el genoma. Como ya postuló S. Ohno hace treinta años, la localización de genes en el cromosoma X de los mamíferos se ha mantenido bastante inalterada.

En otras palabras, los genes del cromosoma X, por estar sometidos a una regulación de la transcripción especial, de ámbito cromosómico, se verían forzados a permanecer en este cromosoma durante la evolución de los mamíferos. Por el contrario, los genes cuya regulación no dependa del cromosoma en que se ubiquen estarían libres para cambiar de posición en el genoma durante la evolución. No obstante, existen excepciones a estos postulados. En primer lugar, se sabe que algunos genes del X no se ven sometidos a la regulación transcripcional descrita previamente, es decir, se "escapan" al fenómeno de inactivación del X. En segundo lugar, para los genes localizados en la PAR tanto los individuos XX como los XY



1. Patrón de herencia pseudoautosómica. Esta hibridación de Southern ("Southern blot") demuestra que los alelos del gen STS en los cromosomas X e Y del macho procedente de una primera generación (calle 2) sufren recombinación durante la meiosis. Por ello, el retrocruzamiento del macho de primera generación con hembras homozigóticas (calle 1) produce varios machos (calles 3, 5 y 7) que han heredado un cromosoma Y recombinante y son, por tanto, homozigóticos para STS



2. Apoptosis en las células germinales de machos híbridos de primera generación resultantes de cruzamientos entre especies distintas (musculus × spretus). *La técnica TUNEL pone de manifiesto la existencia de núcleos apoptósicos (*marrón*) en numerosos espermatocitos de una sección de testículo. El patrón típico de degradación internucleosómica se observa en la autorradiografía del recuadro* (esquina superior derecha)*, donde las calles 1 y 2 son controles positivo y negativo de apoptosis, respectivamente. Las calles 3 y 4 muestran el patrón característico de apoptosis en ADN de testículos de híbridos de primera generación*

tendrían doble dotación génica. Por tanto, es predecible que los genes de la región pseudoautosómica escapen al fenómeno de inactivación del X, para mantener la compensación de dosis génica.

No resultó tarea fácil la búsqueda de genes murinos homólogos a los pseudoautosómicos humanos. Pese a que se ha logrado, a lo largo de los últimos 10 años, clonar y caracterizar varios genes de la PAR humana, no se ha encontrado ningún gen homólogo que haya conservado su posición en la PAR a lo largo de la evolución de los ratones. Algunos genes murinos, como Csfgmra e IL3ra, se alojan en autosomas, en tanto que sus equivalentes humanos se hallan en la región pseudoautosómica. Ocurre, además, que la secuencia de estos genes ha sufrido muchos cambios en el curso de la evolución, lo que hace prácticamente imposible la clonación por hibridación cruzada entre especies.

Ante el fracaso en los intentos acometidos por clonar genes pseudoautosómicos en el ratón, llegó incluso a dudarse de la existencia de tales genes en esta especie. Tanto es así que, hasta la fecha, el único gen funcional de la PAR murina sobre el que hay información molecular es el gen de la sulfatasa esteroidea (STS), clonado recientemente por nosotros. Importa resaltar, sin embargo, que el gen homólogo humano (STS) se encuentra también en el cromosoma X, aunque se aloja muy cerca del comienzo de la región PAR. Da, pues, la impresión, de que la frontera de la PAR se ha corrido a lo largo de la evolución de los mamíferos.

¿Cuál será, entonces, el común denominador de la región pseudoautosómica que compartan todos los mamíferos? Si comparamos la PAR humana con la murina, observamos que se trata de una región que favorece el apareamiento X-Y dentro de una misma especie. Por otro lado, esa región debe desempeñar un papel importante en el proceso de especiación, mediante el cual dos poblaciones de una misma especie acaban convertidas en especies distintas. En efecto, los machos híbridos de la primera generación, procedentes del cruzamiento de dos especies diferentes, son estériles debido, en gran medida, a la falta de homología entre la PAR del cromosoma X y esa región del cromosoma Y.

Si la secuencia de ADN de la PAR varía mucho entre especies y la recombinación homóloga entre las PAR de los cromosomas sexuales es crucial para que proceda la meiosis masculina, parece evidente que la PAR interviene de una manera destacada en la especiación. Nosotros hemos observado un alto índice de cambios en la estructura física de la PAR murina que acontecen *de novo* durante la meiosis masculina. Este hallazgo abunda en la peculiaridad de la PAR murina; en ésta se generan nuevos alelos con una frecuencia sin precedentes entre los genomas de mamífero estudiados.

Desde los años veinte se conocía ya el fenómeno mencionado de la esterilidad de los híbridos interespecíficos. Merced al desentrañamiento molecular de la PAR murina se ha podido dar un paso más y atribuir tal esterilidad a la falta de homología y recombinación entre los cromosomas X e Y durante la meiosis. La investigación en humanos que sufrían deleciones distales del cromosoma X ha demostrado que la PAR resulta imprescindible para la correcta progresión de la meiosis masculina.

De forma complementaria, se ha comprobado que el ratón híbrido resultante del cruzamiento de las especies *musculus* y *spretus* no es más que prueba del fracaso del apareamiento X-Y, con degeneración de las células germinales en estadio M1. Profundizando en el mecanismo básico responsable de este fenómeno, hemos observado que los espermatocitos primarios activan genes de apoptosis, o muerte celular programada. Tal activación se debe a la falta de homología entre la PAR del cromosoma X y esa región del Y.

La apoptosis del ratón garantiza la identidad de especies diferentes, al tornar inviables las células germinales del macho híbrido. ¿Cuáles son los genes reguladores principales de este proceso? ¿Se trata de una variante de apoptosis dependiente del gen p53? La contestación a estas y otras preguntas nos la darán futuras investigaciones en ratones. Podemos contar con animales transgénicos que expresen determinados genes en los espermatocitos, así como animales deficitarios en genes concretos cuya función nos cuestionemos.

NATALIA MARTÍN, Mª ROSA ARNAU, EDUARDO SALIDO
Hospital Universitario de Canarias y Universidad de La Laguna

Prototropía y metalotropía

En derivados de pirazol

En biología los compuestos heterocíclicos, es decir, aquellos en que los átomos de la molécula configuran un anillo o círculo, ocupan un lugar preeminente. De esa naturaleza son, en efecto, los ácidos nucleicos, los pigmentos, las vitaminas y los antibióticos. Pero no es menor la importancia de los compuestos heterocíclicos en química de la coordinación.

El pirazol es un heterociclo aromático de 5 átomos perteneciente a la familia de los azoles (*figura a*). Los átomos de nitrógeno contiguos del pirazol son de naturaleza distinta y dual. ¿En qué reside la naturaleza distinta? Son diferentes ya que el N1 se encuentra unido a un átomo de hidrógeno que puede romperse heterolíticamente dándole a la molécula un carácter de ácido prótico débil. Por otro lado el N2 cuenta con un par de electrones que le confieren características básicas medianamente fuertes.

La fácil transferencia del protón desde N1 a N2 (*figura b*) hace que la naturaleza de estos átomos de nitrógeno sea doble en la mayoría de los pirazoles y la convierten en una interesante molécula para el estudio de procesos de prototropía (movimiento de los protones entre diferentes posiciones de la molécula) intra e intermolecular, tanto en disolución como en estado sólido.

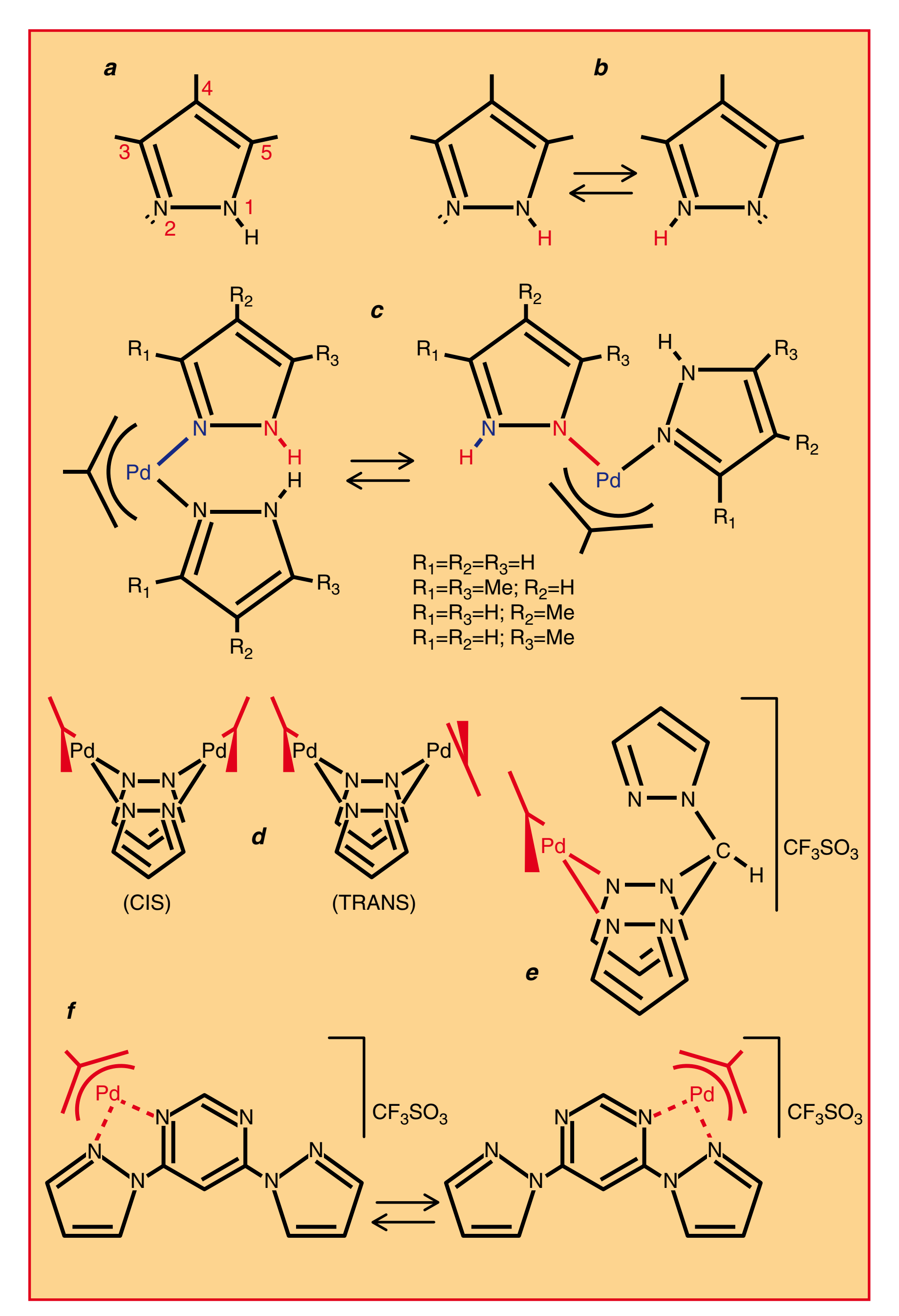
El camino seguido por el protón en este tipo de transferencias tiene directas implicaciones en el mecanismo de acción de numerosas moléculas de interés biológico. De manera particular, en ciertas enzimas. Sea por ejemplo la alcohol deshidrogenasa del hígado, encargada de metabolizar alcoholes primarios o secundarios a aldehídos o cetonas, respectivamente, mediante un mecanismo de oxidación deshidrogenativa. El pirazol y algunos de sus derivados inhiben la acción de la enzima.

El mecanismo de inhibición de la enzima supone la coordinación del heterociclo en un centro activo de Zn que hace de cofactor y que, de este modo, queda bloqueado. Posteriormente, tiene lugar la migración del protón pirazólico a una molécula de dinucleótido de nicotinamida y adenina (NAD), que actúa como coenzima.

Los procesos de transferencia protónica y de prototropía transcurren por efecto túnel. Dicho de otro modo: la energía puesta en juego puede resultar bastante menor que lo que supondría la simple ruptura de enlaces N-H o C-H.

Un tipo de procesos relacionados con la prototropía en el dominio de la química de la coordinación es la metalotropía, en virtud de la cual un centro metálico puede intercambiar su posición de coordinación (lugar de una molécula en la que se encuentra unido) de una forma dinámica y reversible. Cuando las posiciones que puede ocupar el centro metálico en la molécula son equivalentes desde un punto de vista estérico (de congestión espacial) y electrónico, el proceso se asemeja al de prototropía existente en el pirazol. Ahora bien, en este caso la energía de activación puesta en juego suele ser más elevada y guarda relación con la intensidad del enlace N-metal.

En nuestro laboratorio de la Universidad de Castilla la Mancha



Algunos ejemplos de moléculas derivadas de pirazol en las que se ha estudiado el fenómeno de prototropía o de metalotropía

venimos estudiando, desde hace unos años, procesos de metalotropía en disolución de complejos de paladio que llevan coordinadas moléculas de pirazol o derivados. La técnica que usamos es la resonancia magnética nuclear (RMN), principalmente de protón ya que permite un análisis muy detallado del entorno químico que tiene cada átomo de hidrógeno en la molécula formada por coordinación con el centro metálico. Por otro lado, el uso de esta técnica permite, mediante el registro a temperatura variable, un estudio pormenorizado de los cambios que se producen en este entorno en el proceso dinámico de intercambio metalotrópico siempre y cuando la energía puesta en juego se encuentre entre 10 y 20 Kcal/mol.

Un ejemplo reciente lo muestran los complejos de fórmula general $[(2\text{-metil-alilPd})(pzH)_2]CF_3SO_3$ (pzH = pirazol) (*figura c*). En este tipo de derivados se observa un proceso simultáneo de prototropía y metalotropía, en la que metal y protón intercambian sus posiciones relativas.

El fenómeno de metalotropía puede detenerse o al menos mitigarse tanto por razones estéricas como electrónicas. Un ejemplo de lo primero lo constituye el derivado $[(2\text{-metil-alilPd})(5\text{-}^tBupzH)_2]CF_3SO_3$. En esta molécula, el volumen de los grupos ^tBu (*tert*-butilo) impide la coordinación del metal en el N más próximo a dicho grupo por lo que el proceso de metalotropía anteriormente comentado desaparece. Un ejemplo de la influencia electrónica sobre la metalotropía lo constituye el complejo $[(2\text{-metil-alilPd})(\mu\text{-pz})]_2$ en el que existen puentes de pirazol desprotonado (pirazolato), mucho más básico que el pirazol y con enlaces Pd-N más fuertes. Este complejo existe en dos conformaciones cis y trans (*figura d*) de acuerdo con la orientación relativa de los grupos alilo. Estos dos isómeros no se convierten entre sí en los tiempos de detección de RMN, señal de que los enlaces Pd-N no se rompen o que su ruptura supone una elevada energía.

Otros interesantes ejemplos de complejos con metalotropía en derivados de pirazol lo constituyen los indicados en las figuras *e* y *f*. En el primero de ellos, los tres grupos de pirazol participan por igual en la unión con el átomo de Pd, a pesar de que sólo dos pueden estar unidos simultáneamente. Un incremento en la basicidad de los grupos pirazol hace más lento este proceso testimoniando que la ruptura de los enlaces Pd-N es una etapa importante en el mecanismo de intercambio. En el ejemplo *f*, el fragmento metálico puede migrar con facilidad entre dos posiciones de coordinación que implican a dos átomos de nitrógeno en cada una de ellas. El estudio del mecanismo apunta hacia un proceso intermolecular en el que los grupos de Pd se intercambiarían entre las moléculas que se encuentran en el medio.

Los conceptos de metalotropía y prototropía tienen una gran importancia en el estudio de procesos de transcendencia técnica como son algunos de tipo enzimático o catalítico que encuentran aplicación en el campo de la biotecnología y que implican transferencia protónica acompañada o no de transferencia electrónica. Asimismo, el movimiento de iones metálicos sustituye al más clásico de electrones en las modernas baterías de litio basadas en la llamada conductividad superiónica.

FÉLIX A. JALÓN SOTÉS,
BLANCA R. MANZANO MANRIQUE,
ANA M.ª RODRÍGUEZ
Facultad de Químicas,
Universidad de Castilla-La Mancha.
Ciudad Real.

Citología

¿Qué son las MAR?

El ADN de todos los organismos eucariotas, desde las levaduras hasta el hombre, se encuentra fuertemente empaquetado en el núcleo celular. Dicho ácido nucleico forma un complejo (la cromatina) con determinadas proteínas.

Hay dos tipos de cromatina: una más condensada, o heterocromatina, y otra más laxa, o eucromatina. El ADN de la heterocromatina no contiene genes; está constituido por secuencias repetidas carentes de información genética. En la eucromatina, por contra, se encuentran los genes del organismo, así como una gran cantidad de ADN inter e intragénico carente de información.

Si el núcleo celular se incuba con nucleasas, enzimas que digieren el ADN, comprobaremos que las secuencias que antes se digieren son las que portan los genes expresados por la célula. De ello se infiere que existen, al menos, dos tipos de eucromatina, una más "accesible", donde se encuentran los genes que se están expresando, y otra más condensada, donde está el ADN que la célula no expresa.

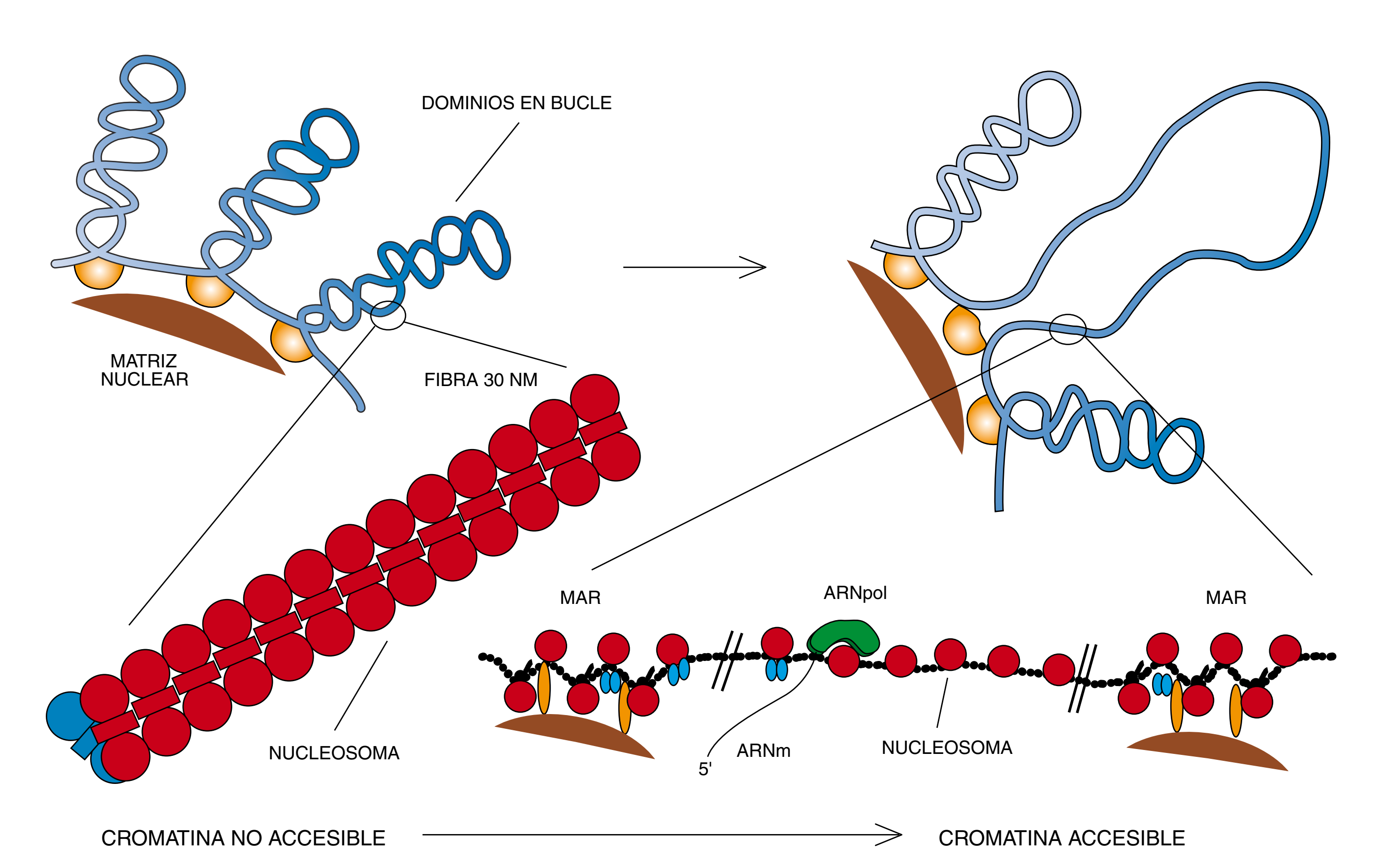
La idea de accesibilidad de la cromatina, que emergió del empleo de nucleasas, llevó a suponer que la maquinaria encargada de transcribir los genes en ARNm, las ARN polimerasas, también podría discriminar entre distintos grados de accesibilidad en el ADN. Los trabajos realizados en el laboratorio de Gary Felsenfeld, del Instituto Nacional de la Salud en Bethesda, demostraron que la región o *locus* que contenía los genes de las globinas sólo era accesible en las células eritroides; esta accesibilidad precedía a la transcripción de dichos genes. Parecía, por tanto, que la cromatina donde se alojan los genes que se expresarán en un tejido debía primero modificarse.

Pero, ¿cómo se empaqueta la cromatina y qué tipo de modificaciones explican su diversidad? ¿Cómo dicta la célula qué regiones de la cromatina deben ser accesibles?

La unidad básica de empaquetamiento del ADN en la cromatina la constituyen los nucleosomas, pequeños cilindros formados por proteínas histonas, sobre los que se enrolla el ADN en una doble vuelta de aproximadamente 160 pares de bases. A modo de cuentas en un collar, los nucleosomas cubren enteramente, con la excepción de pequeñas regiones entre un nucleosoma y el siguiente, los cientos de millones de pares de bases de las moléculas de ADN.

Los nucleosomas se organizan, a su vez, en estructuras de orden superior: en fibras de 30 nanómetros (a modo de solenoides) y en dominios con forma de bucle, de un tamaño medio de 100.000 pares de bases. Estos dominios de la cromatina se anclan en la "matriz nuclear", una especie de andamiaje nuclear que queda visible tras eliminar las histonas mediante lavados con altas concentraciones de sal o tratamientos con detergentes.

La "matriz nuclear" está tejida por una red de filamentos de proteínas, entre las cuales se encuentran las laminas, a los que se asocian otras que podrían mantener el grado de condensación de los dominios de la cromatina. La idea de que la matriz nuclear constituía un elemento esencial del empaquetamiento de la cromatina se vio respaldada tras el



Así podrían actuar las MAR para regular el grado de empaquetamiento de los dominios de la cromatina. De acuerdo con el modelo representado, las proteínas de unión a las MAR intervendrían, junto a factores de transcripción asociados a secuencias intensificadoras, para asociar el ADN a la matriz nuclear. Esta misma combinación de proteínas sería la responsable de controlar diversas actividades enzimáticas que modificarían la cromatina para variar su grado de empaquetamiento

descubrimiento, realizado en el laboratorio de Ulrich Laemmli en la Universidad de Ginebra, de que la enzima topoisomerasa II se encuentra asociada a ella. La topoisomerasa II es la encargada de separar las dos moléculas del ADN tras la replicación, así como de controlar el grado de superenrollamiento del ADN. Además, se ha demostrado *in vitro* que la actividad de la topoisomerasa II es necesaria para la condensación de los cromosomas.

La asociación del ADN a la matriz nuclear no es un proceso al azar. Se han identificado secuencias del ADN que se unen a ella de forma específica. Estas secuencias, denominadas MAR (en inglés "*m*atrix *a*ttachment *r*egions"), son regiones del ADN de varios cientos de pares de bases, ricas en residuos de adenina y timina, que aparecen tanto en los límites de *locus* como asociadas a secuencias reguladoras de los genes, secuencias intensificadoras (*enhancers)*.

En el laboratorio de Rudolf Grosschedl, de la Universidad de California San Francisco, se ha demostrado que las regiones MAR asociadas a la secuencia intensificadora del gen μ de las inmunoglobulinas son necesarias para conferir una expresión de este gen independientemente de la posición de integración cromosómica. Es decir, la combinación μ-*enhancer*/MAR actuaba como un elemento controlador de *locus*, para crear así un dominio funcional en la cromatina.

Más recientemente se ha comprobado que esta combinación μ-*enhancer*/MAR crea en la cromatina de los linfocitos B un dominio de accesibilidad que permite a las ARN polimerasas iniciar la lectura.

Pero, ¿cuál es el mecanismo por el que las MAR modifican la cromatina? La respuesta puede muy bien ser múltiple. Se sabe que la cromatina activa presenta algunas características que la distinguen. Por ejemplo, la presencia de histonas de tipo H1, clave en la organización de las fibras de cromatina, se ve disminuida en la cromatina activa, del mismo modo que hay un aumento en la cantidad de histonas H4 acetiladas. Los experimentos realizados *in vitro* sugieren que ambos fenómenos podrían crear una cromatina más accesible.

Recientemente, además, se ha involucrado a las MAR en la desmetilación específica de genes durante el desarrollo, un fenómeno esencial en mamíferos para establecer el patrón de expresión génica en las células de los distintos tejidos. Es posible que las MAR, en combinación con los factores de transcripción vinculados a secuencias intensificadoras, promuevan la asociación de dominios del ADN a la matriz nuclear, donde intervendrían enzimas diversas para modificar la cromatina (acetilación de histonas, desmetilación del ADN, eliminación de histonas tipo H1, etc.). En los próximos años quizá pueda identificarse esa maquinaria enzimática y descubrir cómo regula la célula su actividad de manera tan precisa.

LUIS ANGEL FERNÁNDEZ HERRERO
Dpto. Microbiología e Inmunología
Universidad de California
en San Francisco

DE CERCA

Texto y fotos: Albert Masó

Nacido para volar



Aumento = 3×

En cuanto la oruga empieza a roer el cascarón del huevo está predestinada a volar, pero tendrá que aguardar todavía. Cuando termine el crecimiento larvario, le quedará la fase de crisálida en que completará la metamorfosis para convertirse en insecto adulto, en mariposa. En un principio, las alas que ha desarrollado permanecen retraídas y plegadas en el estuche pupal, pero las extenderá y endurecerá una vez esté libre fuera del capullo.

La oruga —que no es crisálida aún— fabrica el envoltorio pupal protector con cientos de metros de hilo de seda. La especie que ofrecemos es justamente la mariposa de la seda, *Bombyx mori*. Otros lepidópteros construyen su estuche "con salida". No es el caso de nuestro bombícido, que tendrá que disolver el material con el meconio, un líquido corrosivo —constituido por sustancias de desecho del metabolismo de la crisálida— que el adulto expulsará por el abdomen.

Reblandecida ya la salida, la mariposa saca primero la cabeza. Otea el mundo que le espera a través de sus ojos compuestos y consolidará sus alas blanduzcas para volar. Así podrá encontrar pareja, reproducirse y completar el ciclo.

Técnica fotográfica:

Las tres tomas se han realizado con un objetivo de fotomacrografía de una distancia focal de 55 mm (f. 2,8). La primera, a la mínima distancia de enfoque (25 cm), lo que daba una ratio (relación de reproducción) R = 1/2, y con un diafragma f. 8. Para la segunda imagen (que obtuvo el 2.º Premio Nacional del Colegio Oficial de Biólogos de España, 1997) se colocó el tubo estándar (extensión: 27,5 mm), que proporciona el tamaño real (R = 1); diafragma: f. 11.

Finalmente, la tercera fotografía se consiguió intercalando un tubo de extensión de 52,5 mm. Así se logró una ratio = 1,5 (50 % más que el tamaño real). El diafragma tuvo que ser f. 16 para obtener la suficiente profundidad de campo, ya que ésta disminuye a medida que sube la ratio.

Las fotos se han tomado en estudio, colocando una cartulina azul cielo detrás, separada, para que salga desenfocada y así proporcione color sin que aparezca la textura del fondo. Empleamos dos flashes normales y dispuestos lateralmente para fijar el movimiento, obtener relieve y evitar sombras.

Aumento = 5,5×



Aumento = 10×

El arma secreta de las avispas parásitas

Las avispas parásitas han de desarrollarse en el interior de orugas vivas. Para medrar en este ambiente hostil utilizan un virus que neutraliza el sistema inmunitario del hospedador

Nancy E. Beckage

La oruga de la derecha no llegará a mariposa. Por mucho que se esconda entre las hojas de la tomatera, a resguardo de depredadores, su enemigo declarado ha dado con ella. En busca de protección y sustento para su prole, la avispa parásita, orientada por el olor característico que despide la oruga, ha encontrado lo que quería. En ese momento, la insignificante avispa hiende la blanda cutícula de la oruga e inyecta en su interior corporal una tanda de huevos. En esa cavidad prosperarán las larvas que nazcan, alimentándose de su propia guardería viva. Llegada su hora, la larva de la avispa saldrá al exterior, rompiendo la cutícula de su hospedadora por los flancos, y empezará a tejer el capullo de crisalidación en la superficie de la propia oruga. Una vez completada la metamorfosis, las avispas han alcanzado la madurez y podrán irse, en tanto que su hospedador morirá irremisiblemente sin pasar de oruga.

Si habláramos de una lucha entre dos, la oruga podría tener alguna posibilidad de ganar, pues posee un sistema inmunitario capaz de encapsular y eliminar los huevos de la avispa invasora antes de que ésta le inflija un daño permanente. Pero la avispa no pugna en solitario. Además de huevos, inyecta grandes cantidades de partículas víricas. Esa infantería vírica neutraliza muy pronto la respuesta inmunitaria, decantando el fiel de la balanza en favor de la progenie de la avispa. La oruga, doblemente parasitada, va dejando de alimentarse, no crisalida y muere prematuramente.

Este tipo de relaciones parásito-hospedador, donde intervienen una avispa, un virus y una infortunada oruga, se cuentan entre las más complejas de la naturaleza. La avispa es un endoparásito; necesita, pues, desarrollarse en el interior de su hospedador. Si la oruga muriera antes de que las larvas de la avispa alcanzaran determinado grado de desarrollo, entonces las avispas parásitas morirían también. Mas, por otro lado, la oruga no puede recurrir a sus defensas inmunitarias para resistir la agresión. Ante tal situación, gran parte de la responsabilidad de que se mantenga ese delicado equilibrio recae en el cómplice vírico de la avispa. Lo mismo que ésta, muchos parásitos de insectos han establecido, por selección, asociaciones con bacterias o con virus que les ayudan en su tarea, a menudo letal.

Un ejemplo sencillo de tal asociación nos lo ofrecen ciertos gusanos parásitos que llevan una bacteria patógena alojada en el sistema digestivo. Los vermes en cuestión regurgitan las bacterias en sus insectos hospedadores a los pocos días de la infección. Las bacterias, que se dividen con suma rapidez, no tardan en convertirse en fuente de alimento para los gusanos que están creciendo. A su vez, éstos generan nuevos recursos al secretar enzimas digestivas que pronto convierten el cadáver del hospedador en sopa de gran valor nutritivo. A modo de contrapartida, las bacterias sacan provecho de los gusanos, que les sirven de medio para invadir otros hospedadores. El gusano y las bacterias, aunque interaccionan entre sí, son organismos estrictamente independientes, pues no comparten genes.

Más estrecha resulta, por contra, la relación de avispas endoparásitas con los virus. No sólo por los destinos de unas y otros, que se entrelazan, sino también por la permanente imbricación mutua del material genético. Más: avispa y virus poseen genes emparentados. Si valiera la provocación, cabría preguntarse: ¿constituyen, acaso, dos entidades o una sola la avispa y el virus?

El primer indicio que sugería que el arsenal de las avispas endoparásitas podría incluir armas insólitas llegó en 1965 de la mano de George Salt, de la Universidad de Cambridge. Sos-

NANCY E. BECKAGE viene enseñando entomología en la Universidad de California en Riverside desde 1990. En el campo de la investigación se ha dedicado al estudio de las estrategias adoptadas por parásitos y patógenos para bloquear el desarrollo de las especies hospedadoras, así como las relaciones de coevolución entre huésped y parásito.

1. LA AVISPA Y LA ORUGA, o el david y el goliat del mundo de los insectos. El poderoso sistema inmunitario de la oruga amenaza los huevos de la avispa, forzados a madurar en el interior del proyecto de mariposa. Pero la insignificante avispa ganará la partida pertrechada con un arma mortal: un virus.





2. LUCHA SIN CUARTEL entre la oruga y la avispa. Los huevos de la avispa evaden el ataque del sistema inmunitario de la oruga gracias a un virus que la avispa inyecta en la oruga en el momento de la oviposición (*a*). El virus desarbola el sistema de células inmunitarias de la oruga, y permite que los huevos, que corren libres en la hemolinfa (*micrografía superior*), se transformen en larvas normales de avispa. El destino de la oruga no es tan afortunado. En el laboratorio, sin embargo, si se lavan los huevos de avispa, éstos pierden el virus protector (*b*) y son rápidamente encapsulados por las células inmunitarias de la oruga (*micrografía del centro*), en cuyo caso no sobrevive ninguna avispa. Si se inyectan virus purificados juntamente con los huevos lavados (*c*), dichos huevos (*micrografía de abajo*) permanecen viables y dan larvas que emergen de la oruga.

pechó que durante la oviposición, y al mismo tiempo que los huevos, las hembras de *Venturia* inyectaban en el interior de la oruga hospedadora sustancias que eran imprescindibles para el desarrollo normal de su progenie. Salt observó, en particular, que el ovario de la avispa contenía sustancias que impedían que los huevos fueran destruidos por el sistema inmunitario de la oruga.

En condiciones normales, los huevos inyectados circulan libremente en la hemolinfa, fluido que llena la cavidad interna de la oruga. Sin embargo, cuando Salt lavó los huevos de la avispa antes de inyectarlos, provocaron de inmediato una reacción inmunitaria. Esos huevos, despojados del misterioso factor que los protegía, acabaron muy pronto destruidos por las células del sistema inmunitario del hospedador. En 1973, las micrografías electrónicas tomadas por Susan Rotheram, también en Cambridge, proporcionaron una pista para conocer la identidad de la sustancia protectora. Mostraban las imágenes que, durante la oviposición, la superficie del huevo de *Venturia*, a su paso por el oviducto, se impregnaba con partículas de tipo vírico.

Unos diez años después, Donald B. Stoltz, de la Universidad de Dalhousie, acometía el estudio taxonómico de las avispas parásitas, en colaboración con S. Bradleigh Vinson, de la Universidad A&M de Texas. Reseñaron la presencia sistemática de partículas de tipo vírico en las especies de avispas que endoparasitan lepidópteros. Observaron, además, que esos virus se replicaban exclusivamente en el ovario de la hembra de la avispa. Durante la oviposición, la avispa inyecta miles de viriones en la oruga, junto con uno o más huevos.

Entraba en lo razonable inferir que esos virus constituían la sustancia ovárica que acompañaba a los huevos de la avispa hasta el interior del hospedador y que anulaba la respuesta inmunitaria del mismo. Pero los indicios no acababan de adquirir suficiente consistencia hasta que, en 1981, Stolz, Vinson y sus colaboradores confirmaron que esos efectos eran inducidos por virus purificados. Pero, ¿qué hacen exactamente esos virus —hoy denominados poliadenovirus— para desbaratar el sistema inmunitario de la oruga?

Para responder a esa pregunta, mis colegas y yo nos centramos en el estudio de *Cotesia congregata*, avispa parásita que llega a poner cientos de huevos en cada oruga. Cuando los huevos eclosionan, las larvas que emergen se alimentan de fluido hemolinfático del hospedador; mas, al no consumir tejido de éste, se le deja sobrevivir bastante tiempo. La polilla del tabaco, *Manduca sexta*, nos sirve como modelo de hospedador. Cualquiera que haya cultivado tomates se habrá topado alguna vez con esas orugas gigantes, verdes como las hojas, que consumen plantas de tomate, de tabaco y de estramonio, y que llegan a alcanzar el tamaño de un dedo meñique. La polilla del tabaco es una especie apropiada para el trabajo de laboratorio; es más fácil obtener muestras de sangre de esas enormes orugas que de ratones.

De acuerdo con nuestras observaciones, una de las consecuencias inmediatas del parasitismo provocado por la avispa *Cotesia congregata* tiene que ver con los hemocitos; estas

células, que circulan en la sangre de la oruga, experimentan una rápida transformación física. Mark D. Lavine descubrió que ese efecto se hacía patente pocas horas después de la oviposición. Los hemocitos afectados adquieren formas redondeadas, incapaces de adherirse a los sustratos, sean de vidrio o huevos parásitos. Además, muestran numerosas ampollas y pequeñas heridas en la membrana por donde escapan contenidos celulares. Los hemocitos dañados se aglutinan entre sí y son retirados de la circulación. En conjunto, esta transformación tiene un sorprendente parecido con el suicidio celular, o apoptosis, que se da en mamíferos.

Los tipos de hemocitos de la oruga más dañados por el parasitismo son los granulocitos y los plasmatocitos; Michael R. Strand ha mostrado que los granulocitos mueren por apoptosis. Se trata, nada menos, que de las células del sistema inmunitario del hospedador, encargadas de responder a la agresión de intrusos, los huevos de *Cotesia* por ejemplo. En una respuesta inmunitaria normal, los granulocitos dan el primer paso y liberan gránulos que recubren el huevo invasor. Después, los plasmatocitos se adhieren a la superficie del huevo en capas múltiples, hasta formar una gruesa cápsula que impedirá el desarrollo del mismo. La eliminación selectiva de los granulocitos y plasmatocitos del sistema circulatorio mina la primera línea de defensa de la oruga contra el endoparásito. Durante la infección por el virus de inmunodeficiencia humana (VIH) se dan fenómenos similares. En este caso, el objetivo del virus son los linfocitos, que, tras aglutinarse, mueren por apoptosis. La víctima queda entonces a merced de los agentes infecciosos oportunistas, de una manera parecida a la desafortunada oruga hospedadora y sus avispas parásitas.

Cuando inyectamos poliadenovirus purificados en orugas exentas de parásitos de la polilla del tabaco, sus hemocitos experimentaron cambios similares, en apariencia y comportamiento, a los observados durante un proceso normal de parasitismo. Pero si inactivamos por medios químicos los virus antes de la inyección, los hemocitos permanecen inalterados. De todo ello se desprende que la supresión inmunitaria requiere que el virus esté capacitado para dirigir la síntesis de proteínas víricas.

Steven H. Harwood ha comprobado que no tardan mucho en aparecer proteínas poliadenovíricas en la oruga. El primer signo de actividad de los genes del poliadenovirus se percibe a los 30 minutos tras la oviposición. En ese intervalo, las partículas víricas se han expandido por todo el hospedador, penetrando en las células, hemocitos incluidos. En nuestro sistema de la polilla del tabaco, sabemos al menos de una proteína cifrada por el poliadenovirus sintetizada en los hemocitos del hospedador parasitado. Le he hemos puesto el nombre de proteína EP1 (del inglés “early factor 1”).

Nos hemos asegurado bien de que EP1 constituye una proteína del poliadenovirus. Podemos inducir su síntesis en la oruga de la polilla inyectando sólo poliadenovirus; es razonable, pues, deducir que el gen *EP1* reside en el genoma del virus (en su serie de genes específicos).

Cabía la posibilidad de que el gen *EP1* residiera en el genoma del hospedador y el virus se limitara a activarlo. Para descartarla, dedujimos parte de la secuencia del gen que determina la proteína EP1 y buscamos luego dicho segmento en otros organismos. El gen *EP1* no lo encontramos en *Manduca*; sí lo descubrimos en el genoma del poliadenovirus. Curiosamente, la producción de esta proteína cifrada por el poliadenovirus guarda correlación temporal con los efectos más espectaculares del parasitismo en los hemocitos del hospedador.

Detectamos niveles altos de la proteína EP1 en el interior de hemocitos al día siguiente de la oviposición, cuando esas células se hallan en un estado avanzado de degradación. Seguimos encontrando signos de la presencia de EP1 en la oruga durante 6 días; al octavo, la función de los hemocitos retornó a la normalidad, pero ya era demasiado tarde para que la oruga frenara la invasión de las larvas de la avispa.

El equipo encabezado por Otto Schmidt, de la Universidad de Adelaida, ha observado una correlación similar en un sistema parásito-hospedador diferente. Primero quedan dañados los hemocitos durante el breve período de tiempo de síntesis de la proteína; la respuesta inmunitaria se recupera, después, a los dos o tres días. Nosotros creemos que el daño sufrido por los hemocitos persiste mientras haya proteínas víricas; una vez caen los niveles de éstas, los hemocitos se recuperan o los reemplazan otros, de suerte que

Insectos alistados en la guerra contra las malas hierbas

Las avispas y los virus no son los únicos organismos duchos en la artillería pesada. Desde hace mucho los humanos vienen ejercitándose en esa guerra. Y últimamente los científicos han convertido a las orugas y sus parásitos en armas letales contra las malas hierbas. De entre éstas, una de especial importancia es el kudzu, una mala hierba de crecimiento rápido, peligrosa trepadora, que recubre unos 3 millones de hectáreas de la parte meridional de los Estados Unidos.

David Orr y sus colegas, de la Universidad Estatal de Carolina del Norte, han desplegado orugas de la polilla de la soja para combatir el kudzu. En los ensayos de campo, las orugas acaban con las hojas de la mala hierba. Nuestro entomólogo confía en que los esfuerzos de la planta para reemplazar las hojas perdidas irán agotando lentamente su enorme sistema de raíces (una planta puede tener unas raíces que lleguen a pesar hasta 130 kilogramos).

Dado que la polilla de la soja no sólo come kudzu, sino también plantas cultivadas, cada oruga entra en el campo equipada con un mecanismo de seguridad que impide su fuga: avispas parásitas que ejecutan a la oruga cuando teje el capullo de crisalidación, asegurando así que no emergerán polillas que puedan dispersarse y reproducirse. Un beneficio añadido es que las orugas parasitadas comen más kudzu, ya que las avispas incrementan tanto su período de alimentación como su apetito.

Se desconoce el mecanismo en virtud del cual los huevos de *Copidosoma truncatellum*, tal es el nombre de la avispa, escapan al ataque del sistema inmunitario de la oruga; la avispa no tiene poliadenovirus. Algunas avispas con poliadenovirus se han empleado también en medidas de control biológico, aunque casi siempre se ha tratado de casos de lucha contra poblaciones de insectos-plaga, como moscas de la fruta, polillas o pulgones.

—*Mia Schmiedeskamp*

vuelve a restablecerse la función temporalmente perdida.

De esta secuencia temporal se infiere que la respuesta inmunitaria del hospedador recobra toda su fuerza antes de que las avispas en desarrollo estén listas para abandonar la oruga. Sin embargo, a diferencia de lo que acontece con los huevos o con las larvas jóvenes, vulnerables, las larvas en fase de desarrollo avanzado resisten la acción del sistema inmunitario. El poliadenovirus retarda la activación del sistema inmunitario, permitiendo a las avispas alcanzar un estado de maduración suficiente como para protegerse por sí mismas.

Bruce A. Webb trabaja en la Universidad de Kentucky con orugas de otras polillas del tabaco parasitadas. Ha descubierto el modo en que las avispas resuelven un último punto débil de su blindaje inmunosupresor. Aunque la respuesta del sistema celular inmunitario de la oruga es esencialmente inmediata, existe cierto intervalo antes de que se sinteticen las proteínas del poliadenovirus que alterarán el comportamiento de los hemocitos del hospedador. Webb ha mostrado que determinadas moléculas proteicas del huevo inyectadas directamente por la avispa en el hospedador confieren una protección inmediata (aunque efímera) contra las células del sistema inmunitario. La protección a largo plazo corre a cargo de los poliadenovirus a través de la síntesis de proteínas víricas por células de la oruga.

Otro aspecto importante de la relación tripartita *Cotesia*-*Manduca*-poliadenovirus es el de la manipulación del desarrollo del hospedador por el parásito. Para un endoparásito que está creciendo resulta beneficioso dilatar la etapa de alimentación de la oruga hospedadora. Por ello, muchos endoparásitos se las ingenian para retardar la metamorfosis de la oruga. Mi interés por la polilla del tabaco parasitada por *Cotesia* tiene que ver con el desarrollo de este hospedador, que permanece suspendido mucho después de que la progenie de la avispa abandone su nido. No es raro que las orugas sufran dos semanas de agonía antes de morir.

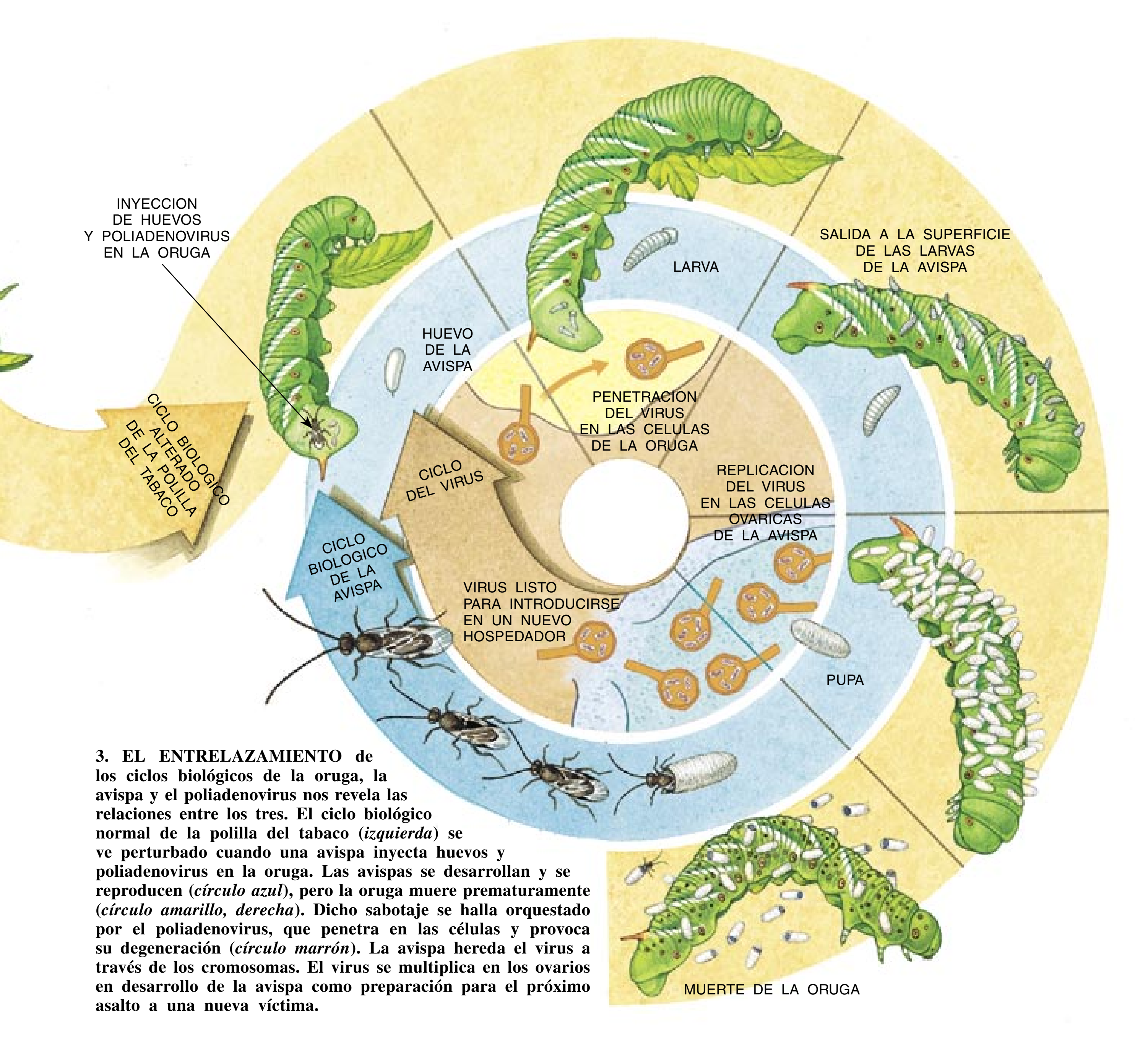
La interrupción del desarrollo en lepidópteros hospedadores se halla mediada por el sistema endocrino. Comencé a abordar las perturbaciones endocrinas causadas por el parasitismo al poco de graduarme. En el laboratorio de Lynn M. Riddiford, en la Universidad de Washington, observé que la concentración de una hormona clave en la regulación de la metamorfosis se desregulaba en cuanto *C. congregata* parasitaba la polilla del tabaco. Los niveles de hormona juvenil se dispararon en hospedadores parasitados, para no descender nunca hasta las bajas concentraciones que requiere la crisalidación. Los altos niveles de hormona juvenil se deben, probablemente, a una deficiencia de las esterasas de dicha hormona, enzimas que la eliminan del organismo. Diríase que el parasitismo conduce a una situación sostenida de niveles bajos de esterasas, de manera que impide la crisalidación incluso después de que las avispas hayan levantado el vuelo.

Se ve, pues, que el poliadenovirus es el principal culpable de la interrupción del desarrollo, aunque se precise de la presencia de la propia avispa para alcanzar una supresión total. Cuando inyectamos dosis bajas de poliadenovirus en orugas sin parasitar, no crisalidan bien. La cantidad de virus necesaria para retardar el desarrollo parece ser inferior a la requerida para suprimir la respuesta inmunitaria. A este respecto, Mitch Dushay ha mostrado que los huevos lavados antes de su inyección retienen trazas de partículas o de proteínas víricas que, si bien no bastan para impedir la encapsulación por las células del sistema inmunitario, sí impiden el desarrollo del hospedador. Los poliadenovirus podrían también contribuir a la suspensión del desarrollo incluso después de que las avispas abandonen la oruga. En nuestra opinión, el virus permanece allí, en infección latente, cual posible inductor de los efectos más duraderos sobre el desarrollo de la oruga.

El poliadenovirus es, sin la menor duda, responsable de la manipulación de programas inmunitarios y del desarrollo del hospedador, al objeto de que la avispa obtenga el máximo beneficio. Su intervención resulta decisiva para el éxito del parasitismo. Pero la solidez de las relaciones entre la avispa y el poliadenovirus resulta aún más clara cuando abordamos la genética de ambos.

El tamaño y la complejidad del genoma de los poliadenovirus supera con diferencia al del ADN de otros virus. Cada poliadenovirus comprende hasta 28 círculos distintos de ADN de doble hebra (de ahí su nombre derivado del inglés “polydisperse DNA viruses”). En 1986 Jo-Ann G. W. Fleming y Max D. Summers descubrieron que el complejísimo genoma de los poliadenovirus se hallaba integrado en el genoma de ambos sexos de las avispas. Se sospecha que el ADN vírico está fragmentado y disperso por los cromosomas de la avispa. La herencia del virus en las avispas sigue fielmente las leyes mendelianas: las secuencias víricas se copian y transmiten a las generaciones sucesivas formando parte de los cromosomas de la avispa. Entre las especies de avispas asociadas a poliadenovirus, jamás se han encontrado individuos desprovistos de éstos. Así pues, la avispa y el virus parecen ser socios permanentes e integrados.

A diferencia de lo que acontece en las infecciones víricas habituales, en que el virus usurpa la maquinaria de replicación de su hospedador para reproducirse a su antojo, en el caso de los poliadenovirus el éxito reproductor se ve afectado por la supervivencia de todas y cada una de las avispas. A cada avispa producida corresponde una copia cromosómica del virus. Esta íntima asociación del material genético de la avispa y el virus explica el papel aparentemente altruista del virus cuando presta su



3. EL ENTRELAZAMIENTO de los ciclos biológicos de la oruga, la avispa y el poliadenovirus nos revela las relaciones entre los tres. El ciclo biológico normal de la polilla del tabaco (*izquierda*) se ve perturbado cuando una avispa inyecta huevos y poliadenovirus en la oruga. Las avispas se desarrollan y se reproducen (*círculo azul*), pero la oruga muere prematuramente (*círculo amarillo, derecha*). Dicho sabotaje se halla orquestado por el poliadenovirus, que penetra en las células y provoca su degeneración (*círculo marrón*). La avispa hereda el virus a través de los cromosomas. El virus se multiplica en los ovarios en desarrollo de la avispa como preparación para el próximo asalto a una nueva víctima.

apoyo al parasitismo de la avispa. El éxito del poliadenovirus depende de la eficacia reproductora de la avispa, función a su vez de esa relación esencial hospedador-parásito. Cualquier contribución del virus al éxito del parásito, redundará en su transmisión a la generación siguiente.

Dado que la transmisión vírica de una avispa a otra se desarrolla a través de la herencia de un virus integrado en el cromosoma, existirá alguna razón que explique la producción en masa de virus en los ovarios de la avispa. De hecho, los virus empaquetados que aparecen en esta fase se dirían inútiles (a tenor del objetivo propio de todo virus: infectar y replicarse) si no fuera por su maestría en la manipulación del hospedador. Los virus son expertos en difundirse por el cuerpo de un hospedador y en penetrar en sus células. Las avispas parásitas controlan semejante habilidad y dirigen la síntesis de proteínas víricas en las células de la oruga, propiciando desde dentro la manipulación de la biología de quien le da cobijo y alimento.

La integración de los poliadenovirus en los cromosomas de la avispa obliga a preguntar por el origen del virus. En una situación normal, la respuesta sería que los virus surgieron autónomos como patógenos de las orugas, o tal vez de las avispas, para combinarse luego con el ADN de éstas. Sin embargo, la asociación única y permanente entre el ADN vírico y el ADN de la avispa mueve a plantear una hipótesis mucho más sugerente. Quizá no existió nunca esa entidad vírica por separado. Las avispas podrían haber adquirido selectivamente la capacidad de copiar y empaquetar una porción de genes de su propio genoma cuya introducción en las células de la oruga revistiera particular interés. Los trabajos de Webb y Summers sobre el veneno de las avispas podrían encajar con esa hipótesis.

Han descubierto esos investigadores que algunos genes que determinan el veneno de las avispas son similares a otros genes hallados en poliadenovirus. Además, los anticuerpos generados en el laboratorio contra esos venenos también reconocen las proteínas víricas que actúan durante la manipulación de la oruga. Por tanto, parece que los genes del veneno de

la avispa y los del poliadenovirus guardan relación desde una óptica evolutiva. Tal idea ofrece una atractivo notable, si recordamos que ciertos venenos proteicos de las avispas desempeñan un papel de apoyo en la manipulación de la fisiología de la oruga.

En un cuadro evolutivo verosímil, los poliadenovirus, independientes en un comienzo, adoptarían del genoma de las avispas los genes codificadores de veneno. En otro marco, la avispa podría haber hallado un medio eficacísimo de utilizar su propio veneno, copiando sus genes, empaquetándolos e insertándolos en las células de la oruga, donde pudieran ejercer un efecto duradero. En ambas posibilidades, resulta en un incremento de la eficacia general, tanto del virus como de la avispa; en cualquier caso, las fronteras genéticas entre la avispa y el virus son oscuras.

Origen aparte, las asociaciones que los poliadenovirus mantienen con avispas y orugas nos ofrecen unas posibilidades de investigación muy prometedoras en el campo de la biología evolutiva. Las perversas tácticas de la avispa y de su cómplice vírico contra la oruga víctima ponen en serio aprieto la tesis según la cual los parásitos más evolucionados son poco virulentos para con sus hospedadores.

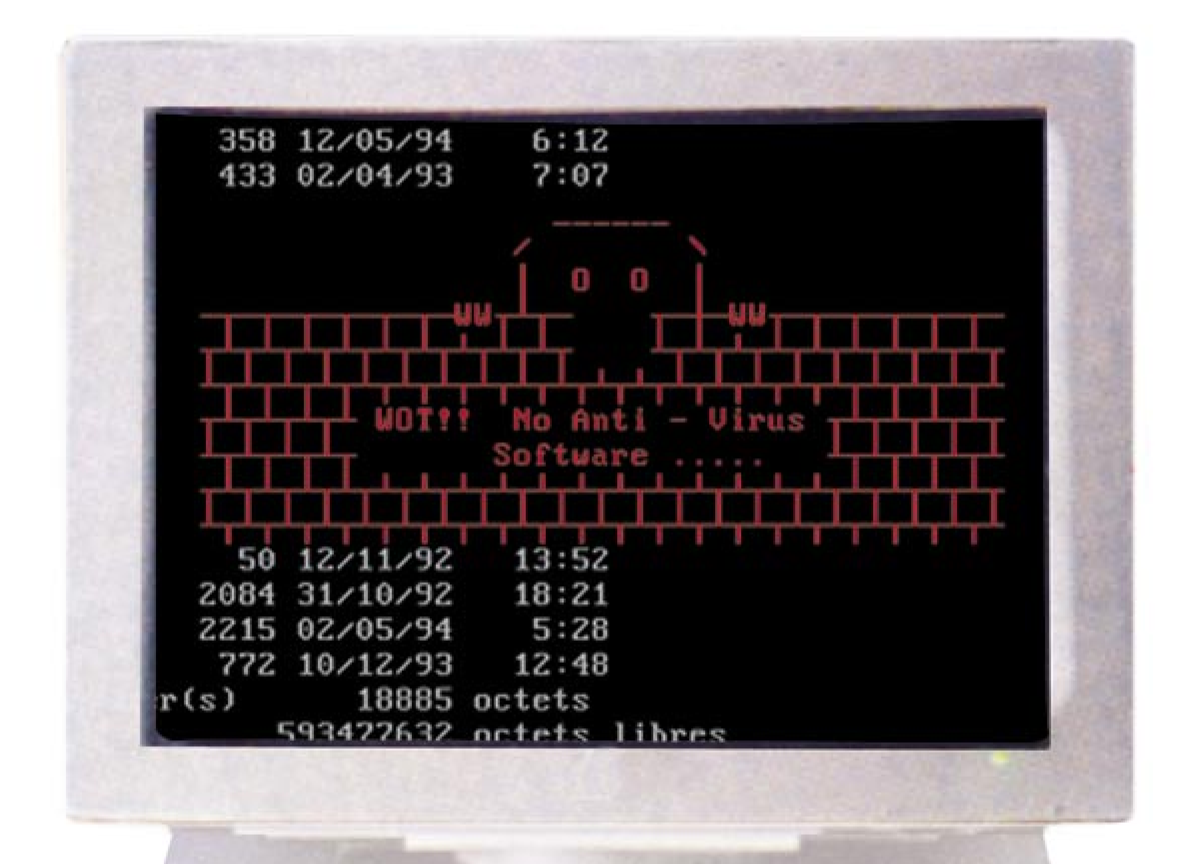
La avispas endoparásitas matan sin remedio a quien le da alimento. El proceso está exquisitamente programado y coordinado, aunque no garantiza el éxito de la avispa. En precioso contraste con esas tácticas contundentes, las relaciones de mutua ventaja entre avispa y virus alcanzan tal grado de trabazón que difuminan las fronteras genéticas entre ambos. Pero, ¿por qué la oruga no llega a convertirse en mariposa? He ahí una cuestión que pondrá en jaque a biólogos de múltiples especialidades en los próximos años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IDENTIFICACIÓN DE SUS PATRONES POR LAS AVISPAS PARÁSITAS. James H. Tumlinson, W. Joe Lewis y Louise E. M. Vet en *Investigación y Ciencia*, n.º 200, mayo 1993, páginas 46-53.

POLYADNVIRUSES: POTENT MEDIATORS OF HOST INSECT IMMUNE DYSFUNCTION. M. D. Lavine y N. E. Beckage en *Parasitology Today*, vol. 11, n.º 10, págs. 368-378; 1995.

PARASITIC WASPS. Donald L. J. Quicke. Chapman & Hall, 1997.



Guerra al virus informático

Las metáforas biológicas nos permiten intuir muchos aspectos de los virus de ordenador y sugerir estrategias defensivas

Jeffrey O. Kephart, Gregory B. Sorkin, David M. Chess y Steve R. White

Los virus informáticos han penetrado en la cultura popular al menos tanto como en el parque mundial de ordenadores. El mismo terror que despiertan las formas artificiales de vida creadas por Mary Shelley en *Frankenstein* inspira numerosas leyendas urbanas y pesadas bromas sobre tales virus en películas y programas televisivos. Sin embargo, la atención científica que se les ha prestado dista de ser suficiente y rigurosa.

Gran parte de su popularidad cabe atribuirla a una semejanza biológica obvia y profunda. En efecto, los virus informáticos se reproducen al adherirse a un anfitrión —que será un programa o un ordenador en lugar de una célula biológica— y optar conjuntamente con él a sus recursos para autocopiarse. Los síntomas observados van de lo desagradable a lo fatal. Además, así como los virus biológicos se propagan en el interior de un organismo y entre distintos individuos, los virus informáticos se contagian de programa a programa y de un ordenador a otro ordenador. Otros agentes patógenos en este terreno, como los "gusanos", que ocasionalmente afectan a las redes, y los "caballos de Troya", programas maliciosos que se revisten de una apariencia atractiva, tienen una incidencia mucho menor en los ordenadores.

Juntamente con nuestros colegas del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, hemos encontrado que la analogía biológica ayuda a comprender la propagación de los virus informáticos en un contexto mundial y sugiere el desarrollo de estrategias defensivas. Tras decenios de investigación matemática sobre epidemias no nos son desconocidos los factores que gobiernan la rápida expansión de los virus. Asimismo, nuestros trabajos sobre la detección de virus y las relaciones entre ellos deben mucho a las técnicas de comparación de patrones elaboradas por los biólogos informáticos. Por si fuera poco, para la protección contra programas contaminados nos hemos inspirado también en el sistema inmunitario de los vertebrados y en su asombrosa capacidad para repeler o destruir patógenos.

Los virus informáticos remontan su ascendencia a los estudios de John von Neumann en los años cuarenta sobre autómatas matemáticos que se autorreproducen. Aunque la idea de programas capaces de infectar ordenadores procede de los setenta, el primer caso bien documentado de propagación de un virus informá-

1. HAY VIRUS INFORMATICOS de más de 10.000 cepas; sólo algunos centenares se han propagado por doquier. Las imágenes de pantalla que aquí se presentan van asociadas a los virus "Chad", "Walker" (caminante) y "Rescue" (rescate), divertidos y ya inocuos.

tico "silvestre" se dio en octubre de 1987, cuando un fragmento de código denominado virus "Brain" (cerebro) apareció en varias docenas de disquetes en la Universidad de Delaware. Hoy día los virus afectan al menos a un millón de ordenadores por año, y los usuarios gastan anualmente centenares de miles de millones de pesetas en productos y servicios antivirus, cifra que va en rápido aumento.

La mayoría de los virus atacan a los ordenadores personales (PC). Hasta la fecha se han detectado más de 10.000 virus. Aunque los descuidos en la programación generan otros seis virus por día, sólo algunos de ellos parece, para nuestra fortuna, que consiguen salir al exterior.

Pueden clasificarse en tres grupos los virus informáticos (y análogamente los otros sistemas patógenos): virus que infectan ficheros, virus de sector cargador y macrovirus. Aproximadamente el 85 % de todos los virus conocidos infectan ficheros que contienen aplicaciones del estilo de los programas de hojas de cálculo y de juegos. Cuando el usuario ejecuta una aplicación infectada, el código del virus se ejecuta primero y se autoinstala de un modo independiente en la memoria del ordenador de suerte tal que pueda autocopiarse en las siguientes aplicaciones que ejecute el usuario. Ya en su lugar, el virus devuelve el control a la aplicación infectada; el usuario no se entera ni de su existencia. Finalmente, el programa contaminado llegará a otro ordenador a través de un disquete o red compartidos, y el ciclo de la infección volverá a iniciarse.

Los virus del sector cargador, responsables de un 5 % de las cepas víricas de PC conocidas, residen en una parte especial del disquete o disco duro que se lee y almacena en memoria para ejecutarla cuando el ordenador arranca. El sector cargador, como su mismo nombre indica, normalmente contiene el código de los programas que han de cargar el resto del sistema operativo del ordenador. Una vez cargado, un virus del sector cargador puede infectar cualquier disquete que se coloque en la unidad controladora. También infecta el disco duro, de manera que el virus se cargará en la memoria siempre que se reinicie el sistema. La eficacia de estos virus es alta: aunque hay menos estirpes, antaño tuvieron mucha más importancia que los virus que infectan ficheros.

La tercera categoría, los macrovirus, no dependen de los sistemas operativos e infectan ficheros que suelen considerarse más bien de datos que de programas. Muchos programas de hoja de cálculo, base de datos y tratamiento de textos pueden ejecutar rutinas (scripts) —secuencias prescritas de acciones— insertadas dentro de un documento. Tales rutinas, o macros, se utilizan para automatizar acciones que van desde la escritura de palabras largas a la realización de complicadas series de cálculos. Y los autores de virus han creado rutinas que insertan copias de sí mismas en otros documentos. Así, los macrovirus pueden propagarse con mucha mayor rapidez que los otros tipos de virus, dado que mucha gente comparte libremente ficheros de "datos", como en el caso de varios expertos que se intercambian borradores de un informe redactado en comandita. El primer macrovirus "silvestre" que se observó fue "Concept" (concepto), que infectó su primer documento de Microsoft Word en 1995 y es el virus que ahora predomina mundialmente. Se conocen más de 1000 macrovirus.

Además del código básico de la repetición, los virus pueden contener cualquier otro código que elija su autor. El contenido útil de un virus puede reducirse a imprimir un mensaje o presentar una imagen, pero en otros casos puede dañar los programas y los datos. Incluso los que no llevan un contenido malicioso pueden perjudicar a sistemas cuya configuración difiera de lo que esperaba el creador del virus. Por ejemplo, el virus "Form" (forma), que sólo produce usualmente un ligero ruido de chasquido una vez al mes, sobreescribe un sector de directorios del disco de un modo que es inocuo para los PC antiguos y mortal para los nuevos, que tienen la información del disco dispuesta de manera diferente.

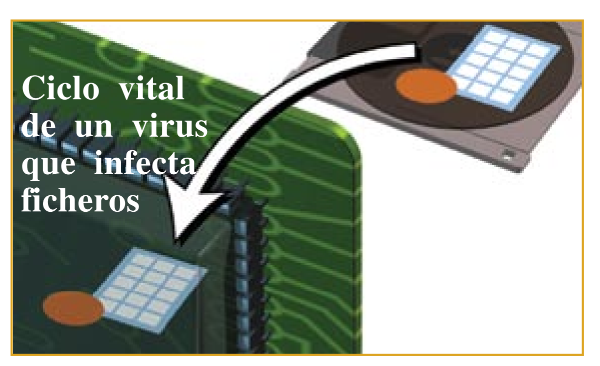
JEFFREY O. KEPHART, GREGORY B. SORKIN, DAVID M. CHESS y STEVE R. WHITE se dedican al estudio de los virus informáticos en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM. Kephart se graduó en ingeniería eléctrica y física en Princeton y Stanford y luego se interesó por las analogías entre grandes sistemas informáticos, ecosistemas y economías dentro de su trabajo posdoctoral en Xerox. Sorkin, que estudió la carrera de exactas en la Universidad Harvard y se doctoró en informática por la de California en Berkeley, es especialista en combinatoria, modelos matemáticos y optimización. Chess se graduó en filosofía en Princeton y en informática en Pace, y ha trabajado mucho en mejorar la calidad de ordenadores, la cooperación entre procesadores y la seguridad antes de dedicarse a las implicaciones de los códigos autocopiativos en sistemas distribuidos. White, doctor en física teórica por la Universidad de California en San Diego, ha diseñado productos antivíricos y sigue dirigiendo su investigación y desarrollo.

Técnicas antivirus

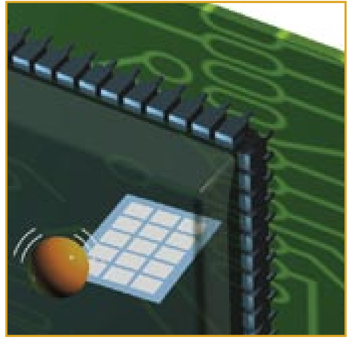
Existen programas antivirus desde poco después de aparecer los primeros virus informáticos. Los programas genéricos de detección de virus observan los posibles comportamientos delatores de un sistema



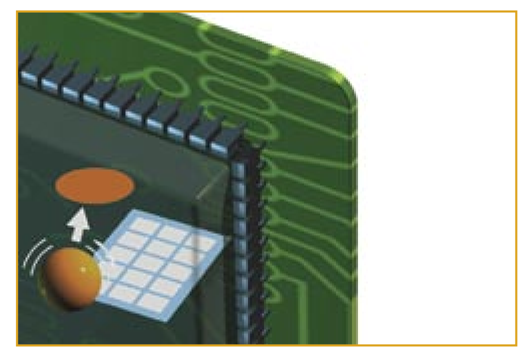
informático (como la modificación de ciertos ficheros cruciales o de partes de la memoria principal), y revisan periódicamente los programas para descubrir modificaciones sospechosas. Estos programas pueden incluso detectar virus desconocidos hasta ahora, pero también provocar falsas alarmas por el parecido que guardan ciertas



Cuando el usuario ejecuta un programa infectado, el ordenador empieza por copiar el programa del disco, donde se almacena inactivo, en la RAM, para su ejecución.



El código vírico se ejecuta primero, mientras el programa infectado sigue durmiente.



El virus se copia a sí mismo en una parte de la RAM separada del programa, de manera que pueda proseguir su trabajo aunque el usuario haya empezado a ejecutar otro programa.

actividades legítimas con la acción de los virus.

Los programas de exploración, por el contrario, pueden rebuscar en ficheros, sectores cargadores y memorias para detectar unos patrones de octetos característicos de virus conocidos. Para mantenerlos al día se han de actualizar siempre que aparezcan nuevas estirpes víricas, si bien es cierto que sólo raras veces provocan falsas alarmas. Estos programas reconocen rúbricas víricas muy cortas: lo típico es de 16 a 30 octetos entre los millares que constituyen un virus completo. (Análogamente, los receptores biológicos inmunitarios se adhieren a secuencias de 8 a 15 de los miles de aminoácidos de que consta una proteína vírica.) Es más eficaz reconocer un pequeño fragmento que comprobar la presencia del virus entero, y una sola rúbrica puede ser común a muchos virus diferentes. La mayoría de los programas exploradores de virus se valen de algoritmos de comparación de patrones capaces de buscar al mismo tiempo muchas rúbricas diferentes; el mejor de ellos puede revisar 10.000 rúbricas en 10.000 programas en menos de diez minutos.

Una vez detectado el virus, hay que eliminarlo. Una técnica eficaz, aunque drástica, consiste en borrar sin más el programa infectado, a la manera de las células inmunitarias que destruyen a una célula infectada. Pero los programas y documentos informáticos suelen ser de reposición más difícil que una célula corporal, y por ello los programas antivirus procuran por todos los medios reparar los ficheros infectados en vez de destruirlos. (En esta conducta les ayuda el hecho de que los virus informáticos deben conservar esencialmente intacto el programa que los alberga para poder pasar inadvertidos y así multiplicarse.)

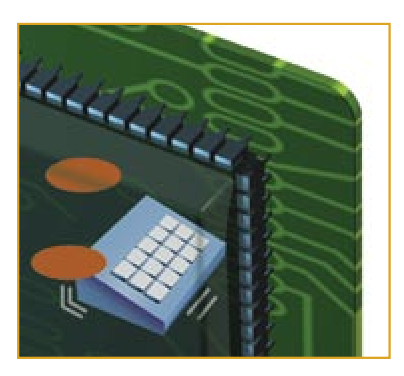
Si un programa explorador específico de un virus detecta un fichero infectado, suele seguir una receta detallada facilitada por sus programadores para destruir el código vírico y recomponer una copia de trabajo del original. También existen técnicas genéricas de desinfección igualmente eficaces para virus conocidos y desconocidos. En un método de nuestra elaboración se reúnen reproducciones numéricas exactas de todos los programas del sistema. Si posteriormente se infecta un programa, podrá de ese modo reconstruirse una copia del original.

Las técnicas de detección y eliminación específicas requieren un detallado análisis de cada nuevo virus que se descubre. Los expertos deben identificar las secuencias desacostumbradas de instrucciones que aparezcan en el código vírico, pero no en los programas habituales, proceso que se basa en conocimientos e intuiciones cultivados con esmero. Además, han de preparar una receta para comprobar y eliminar el virus de cualquier programa anfitrión infectado. Para hacer frente a la aparición de media docena de nuevos virus al día, los técnicos han desarrollado herramientas y procedimientos automatizados que ayudan a los expertos humanos o incluso logran sustituirlos.

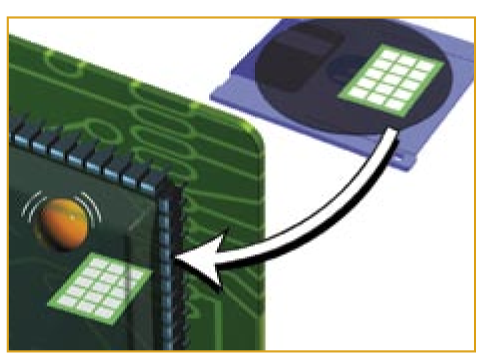
Hemos elaborado una técnica estadística muy directa para extraer con gran rapidez rúbricas de alta calidad. Comenzamos midiendo las frecuencias de las secuencias de octetos cortas en un amplio grupo de programas legítimos. Cuando se nos envía un virus nuevo, nuestro programa determina la secuencia de octetos víricos que estadísticamente tiene menos probabilidades de aparecer en un programa legítimo. Este método es mucho más rápido que el análisis manual, y las pruebas indican que produce rúbricas menos propensas a falsas alarmas que las elegidas por expertos humanos. Nuestro método de extracción de rúbrica se asemeja algo a la anticuada concepción de las “plantillas” para el sistema inmunitario, según la cual los anticuerpos se amoldan ellos mismos a un intruso foráneo en particular; obtenemos así una rúbrica específica para cada nuevo virus encontrado.

Stephanie Forrest, de la Universidad de Nuevo México, y sus colaboradores del Laboratorio Nacional de Los Alamos han elaborado un procedimiento alternativo que se ajusta más a la teoría actualmente aceptada de la “selección clonal” del sistema inmunitario, según la cual el organismo genera una enorme variedad de células inmunitarias y luego produce masivamente las que reconocen un agente patógeno. Su plan genera códigos de rúbrica de un modo aleatorio, sin referencia a ningún virus en particular. Cada rúbrica se contrasta con los códigos existentes en el sistema, y si no coincide con ninguno se la mantiene en una enorme base de datos. Encontrar una de estas rúbricas en un programa es un indicio seguro de que el programa ha sufrido modificaciones, aunque se precisa un análisis ulterior para determinar si ello se ha debido a un virus.

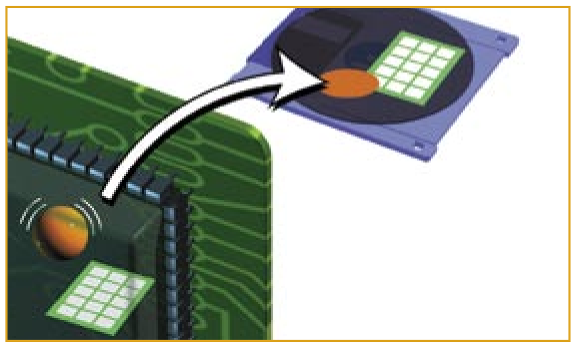
Exprimiendo aún más la metáfora biológica, los cazavirus han sabido aprovecharse de que, cuando se programa, es frecuente crear nuevos virus



Realizado su trabajo inicial, el virus pasa el control al programa infectado.



Cuando el usuario ejecuta un programa diferente, el virus durmiente empieza a activarse de nuevo.



Inserta una copia de sí mismo en programas sin infectar hasta entonces para que pueda repetirse el ciclo de virulencia.

a partir de partes esenciales de los ya existentes. Estos que podríamos llamar "genes" víricos permiten trazar la historia evolutiva de los virus informáticos, del mismo modo que los biólogos determinan los árboles genealógicos de las especies afines. Procesando grandes series de códigos víricos, puede obtenerse automáticamente un conjunto de rúbricas "familiares" que englobe todos los miembros de una familia de virus, incluidas variantes que eran anteriormente desconocidas. Se reduce así sustancialmente la capacidad de almacenamiento requerida: una sola rúbrica familiar de 20 octetos es capaz de reconocer docenas de virus distintos.

Una técnica de red neuronal que hemos desarrollado permite reconocer los virus mediante la exploración de varios patrones, muy cortos, de tres a cinco octetos cada uno. Estos fragmentos minúsculos representan instrucciones de programa que realizan tareas específicas de una infección vírica. Si bien es cierto que un programa convencional puede ocasionalmente contener uno de dichos fragmentos, cuando se detectan muchos de ellos es casi segura la presencia de un virus. Los programas antivirus pueden comprobar con gran rapidez la presencia de estas cortas secuencias. Y lo que es más importante, por estar tales patrones de datos directamente vinculados con funciones víricas podemos hoy reconocer una gran variedad de virus sin haberlos visto jamás anteriormente.

Caza de cepas silvestres de virus

Desde 1990 estamos recogiendo estadísticas sobre virus entre nuestros clientes empresariales referidas a una población de varios cientos de miles de ordenadores personales. En ellas registramos la localización y la fecha de cada incidente junto con el número de PC infectados y la identidad del virus. Estas estadísticas nos permiten deducir muchas consecuencias sobre el comportamiento de virus en estado "silvestre", entre ellas la de que sólo una pequeña parte de los virus crean un auténtico conflicto. En la población estudiada sólo se ha observado un 5 % de todos los virus conocidos, y muchos de ellos se presentaban una vez nada más. A un 10 % de los virus más corrientes se deben las dos terceras partes de todos los incidentes. Además, la persistencia y el éxito de estos virus parece seguir un modelo común: el virus se propaga en el transcurso de un año más o menos, aumentando su número de un modo aproximadamente lineal hasta estabilizarse, tras lo cual su aparición en ordenadores se mantiene a un nivel casi constante, aunque a veces desciende hasta la extinción casi total.

En nuestro afán por comprender estas características, hemos recurrido a los modelos matemáticos de epidemias biológicas. Los modelos más sencillos predicen el comportamiento de una plaga a partir de unos pocos parámetros, siendo el más significativo



2. EN EL CAMPO de batalla digital contienden los programas maliciosos y los programas especializados que les dan caza y reparan sus destrozos. Los virus informáticos se presentan en innumerables variedades y son reconocibles tanto por sus efectos como por los singulares patrones de códigos que encierran. Pueden también protegerse contra los virus los programas normales tomando simplemente instantáneas de los mismos y advirtiendo al usuario sobre los eventuales cambios.

el “índice de natalidad”, que expresa la tasa de infección de los individuos sanos por los enfermos, y el “índice de mortalidad”, a razón del cual los sujetos enfermos se mueren o se curan. Si la relación entre estos dos índices desciende por debajo de un valor crítico, cualquier infección se extinguirá. Cuanto mayor sea esa relación, mayores serán las probabilidades de epidemia y —si no hubiere inmunidad— mayor será el segmento de población infectado en cualquier momento dado.

De acuerdo con nuestros resultados, esta concepción peca de simplismo. A menos que la relación de los índices de natalidad y mortalidad estuviera en las proximidades del valor crítico, el virus debería, o bien morir del todo, o bien propagarse exponencialmente y llegar a ser casi universal. Pero es el caso que numerosos virus se mantienen en niveles estables que son una pequeña fracción de la población total. Un error fundamental de este sencillo modelo proviene de suponer que son uniformes las probabilidades de contacto entre todos los miembros de la población amenazada. Los modelos más elaborados tienen en cuenta el marcadísimo carácter grupal de los patrones típicos de intercambio de programas. En general, sólo se comparten programas y datos con unas pocas personas, en su mayoría dentro de grupos definidos. Si Alicia trabaja con Pepe, y Pepe trabaja con Inés, Alicia e Inés tendrán probablemente que compartir material informático.

Las simulaciones por ordenador han demostrado que el carácter local del contacto favorece un lento crecimiento inicial, lo que cualitativamente concuerda con nuestras observaciones. La dispersión de los intercambios reduce la probabilidad de una epidemia y rebaja el nivel de estabilización, aunque no lo bastante para explicar los datos obtenidos.

La evolución en marcha

Así como los factores externos del tipo de la sequía, la salubridad y las migraciones tienen gran influencia en las epidemias biológicas, los cambios en el entorno informático originan y delimitan distintas épocas de la infección vírica. Hasta 1992, se notificaban en proporciones aproximadamente iguales (y en constante crecimiento)



3. EL PROGRAMA ANTIVIRICO GENERICO señala actividades que —como la alteración de posiciones críticas de la RAM o de ciertos ficheros del disco— probablemente son efecto de un virus. Impedir estos actos ilícitos no eliminará el virus, pero sí podrá evitar que infecte otros programas o que entorpezca el funcionamiento normal del ordenador.



4. EL EXPLORADOR DE RUBRICAS busca en los discos de usuario fragmentos de código de programas que aparezcan dentro de virus conocidos.



5. LAS INSTANTANEAS ANTIVIRICAS captan las reproducciones numéricas de los programas y datos cruciales. Los cambios posteriores indicarán una infección vírica casi segura. Unos algoritmos avanzados permiten recuperar un programa original a partir de la versión alterada por el virus utilizando las instantáneas primitivas.

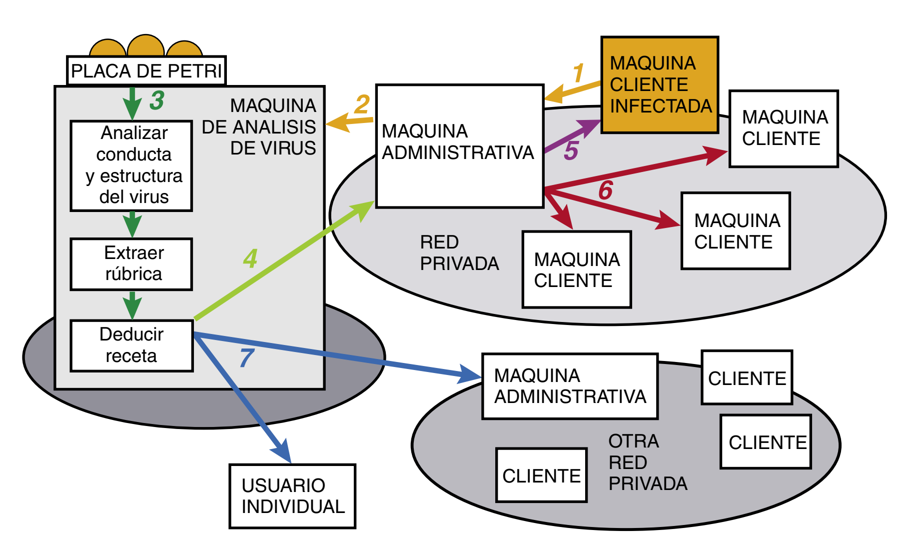
las detecciones de virus de ficheros y las de virus de sector cargador. Después empezó a caer espectacularmente la tasa de incidencia de los que infectan ficheros, mientras que seguía aumentando la de los virus que contaminan sectores cargadores. Entre el final de 1992 y el de 1995, el predominio de los virus de sector cargador fue absoluto. ¿A qué cabe achacar la extinción casi total de las infecciones de ficheros?

Creemos que el motivo fue la aceptación generalizada del sistema Windows 3.1, que se introdujo hacia 1992 como ampliación del sistema operativo MS-DOS, utilizado en la mayoría de los ordenadores. El Windows sucumbe fácilmente ante la presencia de los típicos virus de fichero, y por ello los atribulados usuarios han tenido que buscar el modo de desterrar los virus de sus sistemas (tal vez borrando el disco duro y volviendo a instalar todos los programas), sin cuidarse de averiguar si los problemas los genera un virus. Por el contrario, los virus que anidan en el sector cargador tienden a coexistir pacíficamente con el Windows 3.1; no matan a su anfitrión a menos que la infección amenace con crear un caos.

La gran difusión del Windows 95, otro nuevo sistema operativo más, ha provocado un vertiginoso descenso en la incidencia de los virus de cargador. El Windows 95 avisa al usuario de la mayoría de los cambios en los sectores cargadores, incluyendo muchos de los originados por virus; además, la mayoría de los virus no pueden propagarse en el entorno Windows 95. Conocemos ya unos cuantos virus diseñados específicamente para Windows 95 y otros sistemas operativos de 32 bits, aunque no es probable que estos virus lleguen a generalizarse.

Nos encontramos en la época del macrovirus. Su índice de natalidad es mayor y por tanto su difusión más veloz que la de los virus tradicionales de ficheros o de cargadores, dado que los usuarios, mucho más que programas de ordenador, se intercambian documentos y otros ficheros de datos capaces de albergar macrovirus. Las complejas funciones de correo electrónico y transferencia de ficheros hoy existentes permiten a los usuarios compartir documentos o programas con mayor rapidez y facilidad que antes, lo cual agudiza el problema.

Los macrovirus son los primeros virus que explotan la creciente tendencia al interfuncionamiento entre



6. EL SISTEMA DIGITAL INMUNITARIO del ciberespacio podría comportarse como aquí se indica. Un virus desconocido incita a una máquina cliente a que envíe una muestra a una máquina administrativa (*1*), la cual a su vez envía una muestra cifrada a una máquina central analizadora de virus (*2*). Esta máquina reproduce el virus en una suerte de placa de Petri y analiza su comportamiento y estructura (*3*). La receta resultante se devuelve a la máquina administrativa (*4*), y ésta la envía primero al cliente infectado (*5*) y después a otras máquinas de la red local (*6*). Los abonados de todo el mundo reciben regularmente versiones antivíricas actualizadas que les protegen de nuevos virus (*7*).

ordenadores. Un virus que infecta un fichero DOS nunca será peligroso para un Macintosh, por ejemplo, pero un macrovirus es capaz de infectar cualquier ordenador en el que resida un programa de aplicación vulnerable. El hecho de que el Word de Microsoft pueda ejecutarse en muchos tipos diferentes de ordenadores capacita a "Concept" y otros macrovirus para saltar las tradicionales barreras entre sistemas.

Un sistema digital inmunitario

Los virus actuales suelen pasar de un ordenador a otro mediante un intercambio manual y deliberado de programas. Para tratarlos generalmente basta con el tiempo de respuesta humano. En el caso típico, un virus nuevo con éxito tarda meses y hasta años en conseguir asentarse. Pero en el mundo del próximo futuro, con gran densidad de interconexión, los virus podrían propagarse mucho más deprisa. Ya en 1988 Robert Tappan Morris lanzó el que llegó a llamarse "gusano de Internet" (Internet Worm), un programa que aprovechaba los huecos de seguridad y que invadió cientos de ordenadores de todo el mundo en menos de un día.

Las nuevas técnicas para la carga sigilosa de programas y datos en el ordenador de un usuario —tales como los "navegadores" (browsers) de la Web que utilizan "Active X"— hacen más acuciante este problema. Los modernos programas de correo permiten ya enviar documentos de texto u hojas de cálculo de un modo muy sencillo, como anexos al correo electrónico (e-mail). La apertura del anexo puede provocar el arranque automático de la aplicación apropiada con la plausible ejecución subsiguiente de cualquier macrovirus contenido en dicho anexo. Pronto podría autorizarse, con carácter rutinario, el envío y la apertura de correo acompañado de anexos por agentes informáticos. Si no interviene el hombre en el ciclo de reproducción, los virus tendrán seguramente libertad para propagarse a un ritmo que supera al actual en varios órdenes de magnitud.

Estos cambios en el ecosistema digital sugieren la necesidad de responder a los virus de un modo más automático, no limitado por los tiempos de reacción humanos, ni por lo que puedan tardar los expertos en la disección de un virus nuevo. IBM, Symantec Corporation y McAfee Associates figuran entre las compañías que desarrollan técnicas para responder rápida y automáticamente a los virus nuevos.

En IBM estamos creando lo que podría considerarse un sistema inmunitario para el ciberespacio. Igual que el sistema inmunitario de un vertebrado crea células capaces de combatir nuevos agentes patógenos

tras unos pocos días de exposición a los mismos, el sistema inmunitario del ordenador elabora en cuestión de minutos recetas para reconocer y suprimir los nuevos virus informáticos. En un prototipo actual, varios PC que ejecutan el AntiVirus de IBM se conectan a través de una red a un ordenador central que analiza los virus. En cada PC reside un programa de observación que se vale de una diversidad de heurísticos basados en el comportamiento del sistema, cambios de programa sospechosos o rúbricas de familia para inferir la posible presencia de un virus. Este programa realiza una copia de todo programa sospechoso de infección y la envía a través de la red a la máquina analizadora de virus.

A la recepción de una muestra presuntamente infectada, la máquina la envía a otro ordenador que hace las veces de una placa de Petri digital. El soporte informático de esta máquina de prueba atrae al virus para que infecte programas especialmente diseñados como "señuelo", y ello se logrará mediante la ejecución, la escritura o cualquier otra manipulación de tales programas. Para que el virus se multiplique bien ha de infectar programas que se utilicen a menudo, y entonces la actividad del señuelo sacará el código vírico de su escondrijo. Durante esta fase pueden también deducirse otras características del comportamiento del virus.

A continuación, todos los señuelos infectados podrán analizarse por otros componentes del sistema inmunitario, los cuales extraerán las rúbricas y elaborarán recetas para verificar y eliminar los virus. El analizador de virus suele tardar menos de cinco minutos en preparar tales recetas a partir de una muestra infectada. La máquina de análisis devolverá esta información al PC de cliente infectado, que lo incorporará a una base de datos permanente con remedios para los virus conocidos. Se ordena luego al PC que localice y elimine el virus en todas sus apariciones, y se le protege permanentemente de sucesivos encuentros.

Si el PC está conectado a otros ordenadores en una red de área local, es muy posible que el virus haya invadido también varios de ellos. En nuestro prototipo, la nueva receta se envía automáticamente a las máquinas próximas en la red, y cada una se autorrevisa de modo inmediato. Ya que los virus informáticos pueden aprovecharse de la red para multiplicarse velozmente, parece oportuno que el antídoto siga una estrategia similar para difundirse a los ordenadores que lo necesiten. Si se tiene cuidado de que las recetas más recientes se propaguen a los usuarios de centros todavía no infectados, será posible, en principio, inmunizar con gran rapidez todo el mundo del ordenador personal contra un virus emergente.

Por mucho que se refinen las técnicas que los combaten, los virus informáticos mantendrán siempre una coexistencia difícil con los ordenadores y sus usuarios. Las distintas estirpes crecerán y menguarán, pero en términos generales los virus informáticos y las técnicas antivirus evolucionarán conjuntamente de modo muy parecido a los parásitos biológicos y sus huéspedes. Unos y otros responderán también a cambios del entorno, como por ejemplo los agentes informáticos itinerantes —que habrán de ser protegidos de la corrupción por los sistemas de ordenador que atraviesen, incluso cuando esos sistemas estén ellos mismos a salvo de agentes maliciosos. Quizá los virus informáticos y los sistemas de ordenador inmunitarios no sean sino precursores de un rico ecosistema final de formas de vida artificial que vivan, mueran, cooperen y se ataquen entre sí dentro del ciberespacio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ROGUE PROGRAMS: VIRUSES, WORMS AND TROJAN HORSES. Preparado por Lance J. Hoffman, Van Nostrand Reinhold, 1990.

COMPUTERS AND EPIDEMIOLOGY. J. O. Kephart, S. R. White y D. M. Chess en *IEEE Spectrum*, vol. 30, n.º 5, págs. 20-26; mayo de 1993.

A SHORT COURSE ON COMPUTER VIRUSES. Segunda edición. Frederick B. Cohen, John Wiley & Sons, 1994.

ROBERT SLADE'S GUIDE TO COMPUTER VIRUSES. Robert Slade. Springer-Verlag, 1994.

BIOLOGICALLY INSPIRED DEFENSES AGAINST COMPUTER VIRUSES. Jeffrey O. Kephart, Gregory B. Sorkin, William C. Arnold, David M. Chess, Gerald J. Tesauro y Steve R. White en *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Montreal, 20-25 de agosto de 1995. Distribuido por Morgan Kaufmann Publishers, Inc.

ANTIVIRUS EN DIRECTO. Puede obtenerse información sobre virus en el centro IBM de la Web: http://www.av.ibm.com.

Gran Zimbabwe

Esta antigua ciudad de los shona fue durante siglos nudo capital de una vasta red comercial. Sus ruinas han desencadenado un intenso debate sobre la cultura de Africa a lo largo de su historia

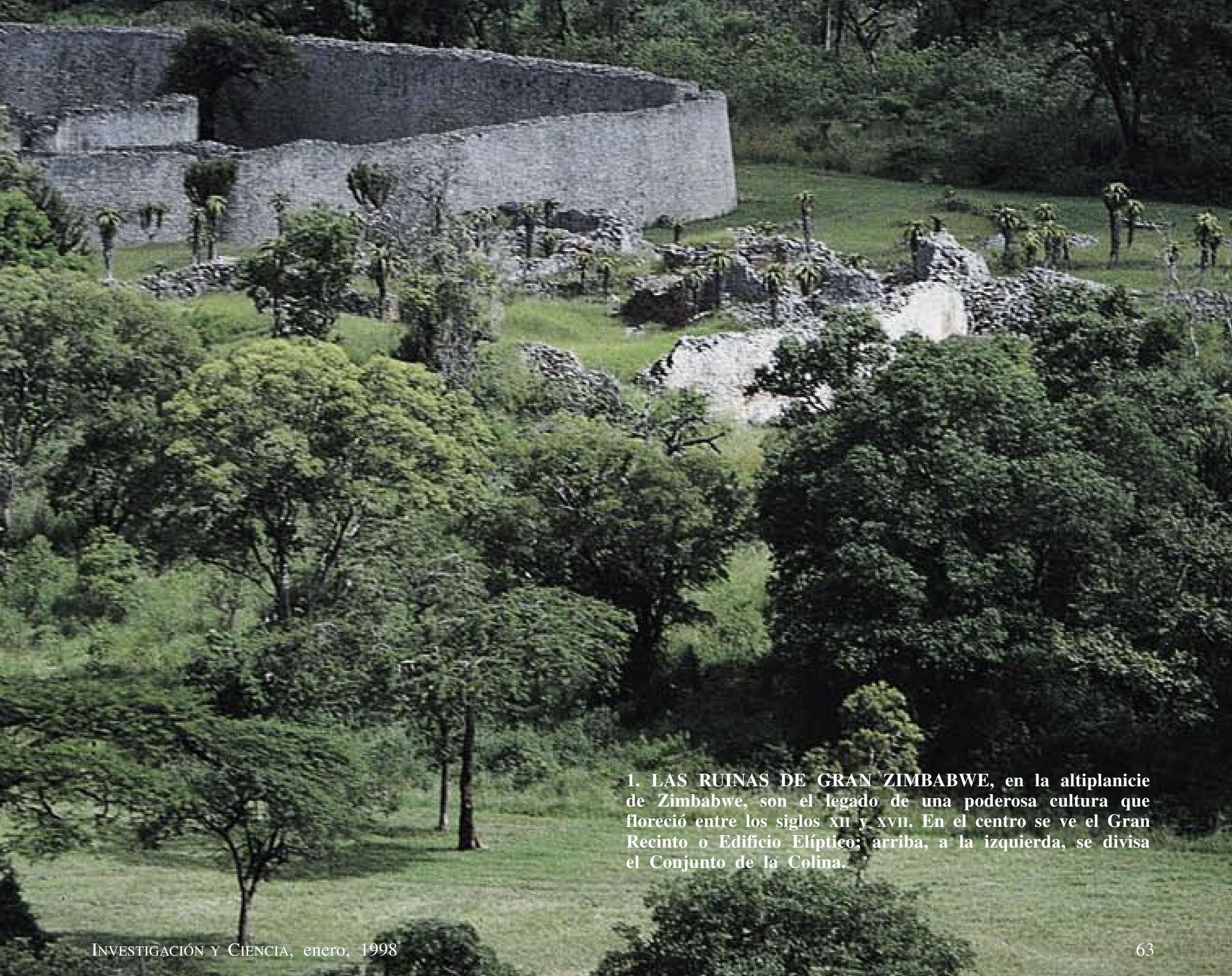
Webber Ndoro

En el extremo sur del altiplano de Zimbabwe, en un valle situado entre los ríos Zambeze y Limpopo, se halla el mayor y más precioso yacimiento arqueológico del Africa subsahariana. Con su alto torreón cónico, sus largos y curvados muros de piedra y sus artefactos cosmopolitas, Gran Zimbabwe atestigua la existencia de una próspera ciudad que, por los siglos XII a XVII, debió de dominar el comercio y la cultura del Africa meridional. Sus impares arquitectura y escultura —especialmente las enigmáticas aves esculpidas en esteatita— dan fe de la riqueza de una historia cuyos misterios aún siguen tratando de descifrar los arqueólogos. Zimbabwe, que se llamaba Rhodesia hasta que en 1980 se independizó de Inglaterra, tomó su nombre actual de este yacimiento.

Como muchas ciudades antiguas, Gran Zimbabwe se ha visto envuelta en la leyenda. Allá por el 1500, los mercaderes portugueses que visitaban Angola y Mozambique —donde establecieron colonias— escribieron acerca de un reino del interior de Africa. Sus descripciones ilusionaron a muchos europeos con que allí se encontrarían las minas del rey Salomón, pues éste, según la *Biblia*, recibía su oro de Ofir. En *El Paraíso perdido*, John Milton sitúa Ofir en algún lugar próximo al Congo y Angola. Este sugerente mito de la ciudad de Ofir habitada por el pueblo semita configuró las posteriores interpretaciones de la historia y la cultura de Gran Zimbabwe. Aquella fábula es, en buena parte, la causa de que en este yacimiento siga habiendo aún tantos misterios para la arqueología. Pues aunque la historia de Gran Zimbabwe es, originariamente, la de la cultura de los primeros *shona* y de la Edad del Hierro africana, también hay que contar con los influjos del colonialismo y de una arqueología a menudo desastrosa por lo inepta y entreverada de connotaciones políticas.

Construida entre los años 1100 y 1600 d.C., Gran Zimbabwe no parece que fuera diseñada de una vez y ateniéndose a un proyecto central, sino que se la iría alterando según lo requirieran su población y sus funciones. Su escala es mucho mayor que la de otros yacimientos similares de la zona —Danamombe, Khami, Naletale y Domboshava (al norte de Botswana), Manikweni (en Mozambique) y Thulamela (al norte de Sudáfrica)—, lo cual indica que Gran Zimbabwe fue el centro económico y político de toda la región. Por su situación en medio del camino más corto entre las zonas auríferas del norte, donde se cernían las aguas de los riachuelos interiores en busca del precioso metal, y el océano Indico, es muy probable que los soberanos de Gran Zimbabwe regularan el floreciente comercio medieval del oro.

Gran Zimbabwe tiene una extensión de unas 700 hectáreas y consta de tres grupos principales de construcciones: el Conjunto de la Colina, el Gran Recinto y las Ruinas del Valle, más pequeñas. El Conjunto de la Colina, llamado por los europeos ‘la Acrópolis’, es la parte más antigua del yacimiento; hay indicios de que



1. LAS RUINAS DE GRAN ZIMBABWE, en la altiplanicie de Zimbabwe, son el legado de una poderosa cultura que floreció entre los siglos XII y XVII. En el centro se ve el Gran Recinto o Edificio Elíptico; arriba, a la izquierda, se divisa el Conjunto de la Colina.







2. LA PERFECTA TALLA de sus piedras y lo curvado de sus muros caracterizan a Gran Zimbabwe, como puede verse en su torreón cónico (*a*), en los redondeados escalones de las entradas (*b* y *c*), en uno de los paramentos del Gran Recinto con su semiborrado dibujo de un cheurón (*d*) y en el pasillo interior del Gran Recinto (*e*). Otros rasgos —así las grandes piedras hincadas en ese patio (*f*)— siguen envueltos en el misterio.

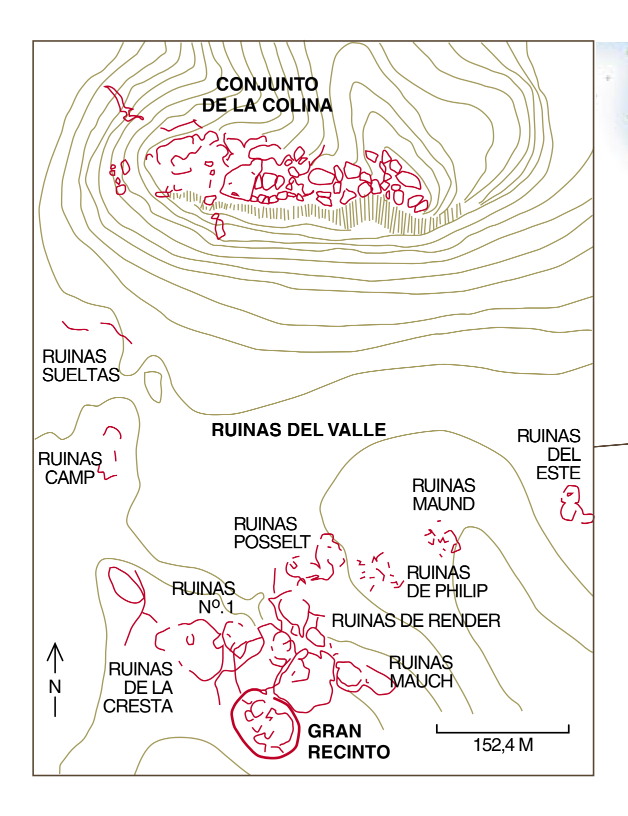
ya en el siglo v acamparon allí cazadores o ganaderos. Sobre la colina de 80 m de altura, el recinto oval —de unos 100 m de largo por 45 m de ancho— era como una atalaya desde la que sus habitantes podrían ver en seguida a cualquier eventual invasor. El muro externo, de unos 11,25 m de altura, les daría también buena protección. En el interior, como en todos los demás recintos similares, se alzarían las casas *daga*, construcciones curvilíneas a manera de chozas hechas con los materiales de construcción más comunes en Africa: áridos y lodo.

En una posición inferior a la del Conjunto de la Colina se hallan las construcciones más imponentes de Gran Zimbabwe, o sea, el Gran Recinto o Edificio Elíptico. Llamado *Imbahuru*, que significa “casa de la matrona” o “la gran casa”, por las gentes de habla karanga que vivían allí en el siglo xix, el Gran Recinto se edificó durante el máximo esplendor y poderío de Gran Zimbabwe. (El karanga es el dialecto común del shona; lo hablan los habitantes del centro y del sur de Zimbabwe.) La muralla del recinto tiene una longitud de 244 m y su altura llega a ser, en algunas partes, de unos 10 m; se calcula que en su construcción se empleó un millón de bloques de piedra. Un muro interior se alza paralelo a un tramo de la muralla externa, quedando entre los dos paredones un estrecho corredor de 55 m de longitud.

No se sabe qué función tendría el Gran Recinto, aunque se le supone palacio real. Por la presencia de ciertas incisiones en los muros (que quizá simbolicen la anatomía femenina) y de varias estructuras fálicas, algunos historiadores han conjeturado que el conjunto serviría para celebrar ritos de iniciación de los adolescentes o para otras ceremonias importantes. También puede que fuese la residencia del harén del soberano. El gran torreón cónico, de 9,14 m de altura y 5,5 m de diámetro en la base, parece ser que no se usó para ningún fin determinado y que sólo tendría una función simbólica.

Además del Conjunto de la Colina y del Gran Recinto, Gran Zimbabwe consta de las Ruinas del Valle, mu-

WEBBER NDORO es profesor del departamento de historia en la Universidad de Zimbabwe, donde enseña administración de los bienes culturales y gestión museística. Graduado en arqueología por la Universidad de Cambridge y en conservación arquitectónica por la de Nueva York, ha sido conservador de los monumentos nacionales de Gran Zimbabwe y coordinador del Programa de los Monumentos desde 1988 hasta 1994.









cho menores. Esta serie de conjuntos secundarios se encuentra en el valle que hay entre las dos construcciones mayores. Sus muros parecen ser de hechura más reciente, lo que sugiere que se hicieron cuando, al aumentar su población, Gran Zimbabwe necesitó más espacio residencial.

Lo extraordinario de Gran Zimbabwe no son solamente sus dimensiones, sino también lo magistral de sus obras de cantería. Muchas de las construcciones están hechas con sillarejos de granito extraídos de afloramientos cercanos. El nombre de la ciudad viene de *dzimbabwe*, que en lengua shona significa “casas de piedra”. Los sillarejos, asentados en hileras sin mortero, forman los lisos paramentos de unos muros curvos que, en algunos tramos, tienen el doble de altura que de anchura. Aunque en la base de muchos de los muros hay restos de unas estructuras redondas como de refuerzo, su función no es de soporte. Algunos arqueólogos piensan que esas prolongaciones curvas servirían para suavizar el acceso a una puerta de entrada, para hacer más difícil el tránsito por los corredores o quizás, incluso, para ocultar a las miradas las habitaciones. Acaso sirvieran también para controlar el acceso a determinados ámbitos, de modo que la gente sólo pudiera pasar por allí yendo en fila de uno en uno.

Hay sitios en los que se ha trabajado la piedra con asombroso detalle: peldaños redondos facilitan ciertas entradas y varios de los muros están decorados con dibujos de cheurones u otras figuras honoríficas. En los muros aparecen, a trechos, orificios de desagüe; al recinto principal se entraba por diversas puertas de 1,25 m de anchura, sobre algunas de las cuales hubo dinteles de madera.

Aunque es muy poco lo que sabemos del pueblo de Gran Zimbabwe, podemos columbrar algo acerca de él por los datos que tenemos de los poblamientos mapungubwe. Según parece, éstos fueron, allá por el año 1000 d.C., el centro de la civilización *shona*. Los mayores asentamientos mapungubwe, hallados en la zona Shashi-Limpopo, se asemejan notablemente a Gran Zimbabwe. Su riqueza se basaba en la ganadería y en el comercio del marfil y del oro. La cultura mapungubwe se difundió por el occidente de Zimbabwe, como lo atestigua la presencia de la cerámica kopje del leopardo (al estilo de Mapungubwe). Al aumentar la importancia de Gran Zimbabwe y cambiar de ruta el comercio, debió de entrar Mapungubwe en decadencia como centro comercial y se fue despoblando a medida que aquélla prosperaba.

3. ZIMBABWE, antes Rhodesia, está en el sudeste de Africa. Hay en el país unos 35.000 yacimientos arqueológicos, el mayor de los cuales lo constituyen las ruinas de Gran Zimbabwe, con una extensión de 700 hectáreas.

Los artefactos desenterrados en Gran Zimbabwe no han servido para aclarar la organización social y cultural del asentamiento, pero sí para distinguirlo de otros de la Edad de Hierro. En especial, una serie de aves de esteatita, de unos de 35 cm de altura en su mayoría y posadas sobre columnas de 91 cm de altura, no se parecen a ninguna escultura de las encontradas en otros sitios. Cada ave es de un tipo o aspecto diferente, y ninguno identificable con los de la avifauna local. Por la consideración en que los shona de hoy tienen a sus muertos, y dado que algunas tribus shona emplean varas de hierro para marcar las tallas de sus difuntos, no han faltado arqueólogos que con-

jeturen que tales imágenes de aves simbolizarían grupos de ancestros en las ceremonias rituales.

Otros artefactos indican que hacia el siglo xiv Gran Zimbabwe constituía ya un emporio comercial bien establecido. Llegaban a ella objetos traídos desde tierras muy lejanas: vasos de cristal sirios, platos verdeceladón chinos (la mayoría de la dinastía Ming, 1368-1644 d.C.), cuencos de fina loza persa, dijes de coral, campanillas de bronce y una cuchara de hierro, utensilio éste no usado por los shona. En cambio, no se encuentran restos de la porcelana china blanquiazul que se difundiría a mediados del siglo xv; su ausencia sugiere que, para entonces, la importancia económica de Gran Zimbabwe había ido a menos. Parece ser que, hacia 1700, la plaza estaba en su mayor parte deshabitada.

Son varias las razones por las que se abandonaría Gran Zimbabwe. A finales del siglo xvii en los ríos norteños no se encontró ya más oro, así que el mercado del mismo se fue trasladando hacia el oeste, y la ciudad, al secarse la fuente de sus ingresos, no pudo mantenerse próspera. Otra posibilidad es que su población llegase a ser insostenible. Según algunas estimaciones, Gran Zimbabwe tuvo, en su apogeo, de 10.000 a 17.000 residentes, una población equivalente a la del Londres medieval. (Según otros cálculos, más a la baja, habría tenido un máximo de 2000 habitantes.) Quizá la zona fuese esquilmada por grandes hordas de rumiantes que la invadiesen para pastar en ella; o quizá fuese sobreexplotada por los agricultores. Recientes datos del entorno sugieren que lo que obligaría a la población a dispersarse sería una sucesión de terribles sequías. También puede ser que hubiese otros motivos, como la guerra, aunque esta hipótesis no la respalda ninguna prueba, aparte de una mínima cantidad de armas. Para resolver la cuestión de la decadencia de Gran Zimbabwe hacen falta más indicios arqueológicos y, por tanto, más sondeos y excavaciones en este y en otros yacimientos de la Edad del Hierro.

Deshabitada durante unos 200 años, es probable que hasta finales del siglo xix Gran Zimbabwe sólo se utilizase con irregularidad para ceremonias religiosas, su único empleo en la actualidad. Fue en el ultimo tercio del pasado siglo cuando llegaron los europeos, ilusionados con la idea de las minas de oro del rey Salomón, y fue entonces cuando el registro arqueológico sufrió tal degradación, que acabaría siendo en gran parte indescifrable.

El primero en llegar fue, en 1871, el explorador alemán Karl Mauch, quien pronto se hizo amigo de otro alemán, Adam Render, que estaba viviendo en la tribu del Jefe Pika, un dirigente karanga, y le condujo hasta Gran Zimbabwe. (De haber sabido las consecuencias, Render, que se había casado con dos mujeres de la tribu y estaba bien integrado, habría arrojado a Mauch al río Zambeze.) Al ver las ruinas, sacó Mauch la muy apresurada conclusión de que Gran Zimbabwe, se tratara o no de Ofir, siendo tan perfecto el labrado de sus piedras y tan avanzada su cultura, no podía ser obra de los africanos. A Mauch le pareció que la habrían fundado colonizadores fenicios o israelitas. Un trozo de madera de un dintel le confirmó en su rápido dictamen: ¡olía como su lapicero, y, por tanto, era de cedro y debía de haberse traído del Líbano!

A la visita de Mauch le siguió una de Willi Posselt, un saqueador que se llevó uno de los pájaros esculpidos en esteatita y escondió otros para volver después por ellos. A Posselt le siguieron una serie de visitantes, algunos de los cuales trabajaban para W. G. Neal, de la Compañía de Ruinas Antiguas, creada en 1895. Cecil Rhodes, fundador de la Compañía de la Sudáfrica Británica, le encargó a Neal la explotación de todas las ruinas de Rhodesia. Neal y su panda de granujas saquearon Gran Zimbabwe y otros yacimientos de la Edad del Hierro, arramblando con el oro y con cuanto fuese de algún valor, derribando construcciones y destrozando y desparramando todo lo que para ellos no valía (fragmentos de cerámica, vasijas, figurillas de greda).

El primer arqueólogo oficial que visitó el yacimiento, el británico James Theodore Bent, había contribuido a la confusión cavando, en 1891, una zanja en torno a la torre cónica del Gran Recinto, con lo que destruyó totalmente la estratigrafía e imposibilitó el que sus tiempos fuesen averiguados después por otros arqueólogos. Bent desechó también artefactos de greda y de metal, entre ellos abalorios persas y árabes, como carentes de significación. Semejante arqueólogo concluyó que Gran Zimbabwe fue construida por una 'híbrida' estirpe local —híbrida porque sus padres debieron de ser unos invasores blancos venidos del norte— puesto que, según lo mantenían Rhodes y la mayoría de los colonizadores europeos, los africanos indígenas jamás habrían podido construir por sí mismos Gran Zimbabwe.

Un informe redactado en 1902 por Neal y el periodista Richard N. Hall reiteraba las conclusiones de Bent: aquella arquitectura era fenicia o arábiga. En el Africa colonial



4. PAJAROS SHONA tallados en esteatita. Frecuentemente rematando el extremo superior de unos pilares, sólo han sido encontrados en Gran Zimbabwe. No se parecen a ninguna de las especies de la avifauna local, y los arqueólogos no han conseguido determinar su significado.

prevaleció por doquier esta tesis: el continente carecía de historia y de capacidad para el refinamiento; sus pueblos y tribus serían siempre lo que eran, incapaces de progresar, culturalmente estériles.

Los arqueólogos que se atrevían a sugerir otras hipótesis no eran bien recibidos. En 1905, David Randall-MacIver, egiptólogo y discípulo de William Matthew Flinders Petrie, excavó en el yacimiento y desenterró artefactos muy similares a los que hoy usan los shona o los karanga, pueblos de la vecindad. Acudiendo a los indígenas en busca de datos culturales y no sólo en demanda de mano de obra, Randall-MacIver hizo algo sin precedentes. Si cualquier otro investigador de su época hubiese recurrido a los saberes y tradiciones de los indígenas locales, muchas de las preguntas sobre Gran Zimbabwe podrían haberse respondido con acierto.



5. EL GRAN RECINTO, visto aquí por el lado opuesto al de la figura 1, quizá fuese el palacio real de Gran Zimbabwe. Fue construido durante el período de máximo esplendor de la ciudad; la muralla que lo circuye mide 243 m de longitud y se calcula que la forman un millón de bloques de piedra.

La similitud de los artefactos le sugirió a Randall-MacIver que la ciudad había sido construida por gentes de parecida cultura. También demostró que los abalorios árabes y persas eran, en antigüedad, del siglo XV o del XVI, y así no tenían nada que ver con los tiempos bíblicos ni con el rey Salomón. Y arguyó que aquellos muros de cantería, por su curvatura y por no estar dispuestos en formas geométricas o simétricas, no eran en absoluto árabes. Randall-MacIver llegó a la conclusión de que los constructores de Gran Zimbabwe habían sido africanos.

Se apuntarían a la misma opinión otros dos investigadores. En 1926, J. F. Schofield reiteró las conclusiones de Randall-MacIver, y en 1929 Gertrude Caton-Thompson llegó también a las mismas. Las excavaciones que hizo esta última en las vírgenes Ruinas Maund —al otro lado del valle y enfrente del Gran Recinto— corroboraron de nuevo la teoría de la construcción por indígenas. Los detallados dibujos y la cuidada estratigrafía de Caton-Thompson han sido decisivos para atar cabos sobre lo poco que se conoce de Gran Zimbabwe.

A pesar del cúmulo de indicios y testimonios arqueológicos, la mayoría de los colonos europeos de Rhodesia rechazaron lo que ya podía darse por cierto. Desde 1965 hasta la independencia en 1980, el Frente Rhodesiano censuró todos los libros y demás materiales disponibles acerca de Gran Zimbabwe. Este partido, fundado por el entonces primer ministro Ian Smith para evitar que los africanos ganasen poder, se basaba en un *apartheid* sistemático. Los arqueólogos que, como Peter S. Garlake, sostenían el origen indígena de Gran Zimbabwe, eran encarcelados y, en algunos casos, deportados. Los africanos que sostenían lo mismo perdían su empleo. También se censuraron las exposiciones hechas en el yacimiento, aunque esto importaba poco, pues solían hacerse en inglés, y a los nativos no se les permitía celebrar allí ninguna ceremonia.

Hoy día Gran Zimbabwe se ha convertido en símbolo del desarrollo cultural africano. La divulgación en libros y folletos ha ido logrando que el monumento sea algo más accesible para el pueblo de Zimbabwe. Sin embargo, al mismo tiempo, la antigua ciudad sigue siendo en gran parte inaccesible. Dadas las actuales condiciones de la arqueología en Sudáfrica, es poco probable que esto cambie pronto.

Los dos arqueólogos destinados ahora allí son responsables no sólo de la conservación del ruinoso monumento, sino también de atender a los visitantes, y bajo su jurisdicción están igualmente otros 5000 lugares arqueológicos (de un total de 35.000 registrados en Zimbabwe). Aunque las ruinas están protegidas por la junta de Museos y Monumentos Nacionales de Zimbabwe y han sido declaradas por la UNESCO Patrimonio de la Humanidad, en el país sólo se cuenta con dos conservadores y con menos de diez arqueólogos para estudiar y velar por todos los yacimientos, incluida Gran Zimbabwe.

No es mejor la situación en otros países subsaharianos. Según Pierre de Maret, de la Universidad Libre de Bruselas, anualmente sólo se gastan menos de 150.000 dólares en 10 países subsaharianos, y entre todos ellos no tienen más que 20 arqueólogos profesionales. En cambio, la venta de objetos africanos al extranjero suma cada año millones de dólares.

Es sabido que los legados culturales se van perdiendo a medida que se deterioran los monumentos y se expolian sus antigüedades. Si las culturas contemporáneas, fragmentadas y dispersas por siglos de colonialismo, se están capacitando para reconocerse y conectar de nuevo con su maltrecho pasado, la arqueología tiene que asumir un papel más importante en la sociedad africana. Gran Zimbabwe significa tanto, no simplemente por lo magistral de sus pétreas construcciones, sino porque es una clave cultural que ha sobrevivido y se ha recuperado. Ahora hay que acabar de descifrarla y situarla en el más amplio contexto de la historia subsahariana, contexto del que todavía queda mucho por descubrir.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ZIMBABWE: A RHODESIAN MYSTERY. Roger Summers. Thomas Nelson and Sons, 1963.

GREAT ZIMBABWE. Peter S. Garlake. Stein and Day, 1973.

THE SHONA AND ZIMBABWE, 900-1850. D. N. Beach. Africana, 1980.

DZIMBAHBWE: LIFE AND POLITICS IN THE GOLDEN AGE, 1100-1500 A. D. Ken Mufuka. Harare Publishing House, 1983.

CULTURE AND DEVELOPMENT IN AFRICA. Dirigido por Ismail Serageldin y June Taboroff. International Bank for Reconstruction and Development/World Bank, 1994.

UNCOVERING THE PAST: A HISTORY OF ARCHAEOLOGY. William H. Stiebing, Jr. Oxford University Press, 1994.

Creación de un arroz resistente a las enfermedades

Los expertos en agronomía han acudido a la ingeniería genética para librar de las enfermedades a este alimento básico

Pamela C. Ronald

El arroz es, sin duda, uno de los alimentos básicos del hombre. Casi dos mil millones de personas —un tercio de la población mundial— fundan en él su dieta de supervivencia. Los campos de arroz cubren más de 145 millones de hectáreas y producen 560 millones de toneladas de cereal cada año. Pero los agricultores siembran mucho más del que cosechan, porque los insectos, las bacterias, los virus y los hongos reclaman su parte. Una de las plagas más devastadoras es la "marchitez" (también llamada "seca" o "quema"), causada por bacterias comunes de Asia y Africa.

Estos microorganismos, de la especie *Xanthomonas oryzae sp. oryzae* (o *Xoo*), se propagan rápidamente de una planta a otra, de un sembrado a otro en gotitas de agua. Las hojas infectadas, resentidas, amarillean y se marchitan en cuestión de días. En campos gravemente afectados, la seca puede acabar con la mitad de la cosecha.

Paradójicamente, el arroz posee un insólito surtido de genes que ofrecen protección frente a multitud de enfermedades, incluida la marchitez bacteriana. Mas, para infortunio del agricultor, ninguna variedad de la especie común tiene todos los genes, y así las plantas son más vulnerables a unas enfermedades que a otras. Los expertos en mejora vegetal han aprovechado los genes de resistencia a las enfermedades durante casi un siglo, trasladando la riqueza genética de variedades resistentes a otras de interés alimentario. Pero los procesos de mejora, laboriosos, exigen mucho tiempo. No es infrecuente que se tarden diez años o más en obtener los caracteres deseados.

Gracias a la ingeniería genética podemos ya introducir en las plantas arroceras, directa y exclusivamente, genes de resistencia a las enfermedades. Con ello se recortan



1. LAS PLANTAS DE ARROZ sucumben ante muchas patologías. Una de ellas, la marchitez de origen bacteriano, causa un daño devastador en la hoja y reduce la producción (*izquierda*). Transportadas por gotas de agua, las bacterias arriban a las hojas heridas. En sólo días las hojas amarillean. Si la infección ocurre en una época temprana de su desarrollo, la planta entera puede morir. Ciertas variedades, sin embargo, portan el gen de resistencia a la marchitez (*derecha*).



años del tiempo necesario para lograr una variedad interesante. En mi laboratorio hemos clonado el primero de esos genes, que protege frente a formas comunes de marchitez bacteriana; hemos creado las primeras plantas de arroz transgénicas del mundo resistentes a las enfermedades. Estas nuevas variedades encierran un enorme potencial del que podrían sacar provecho los agricultores de los cinco continentes.

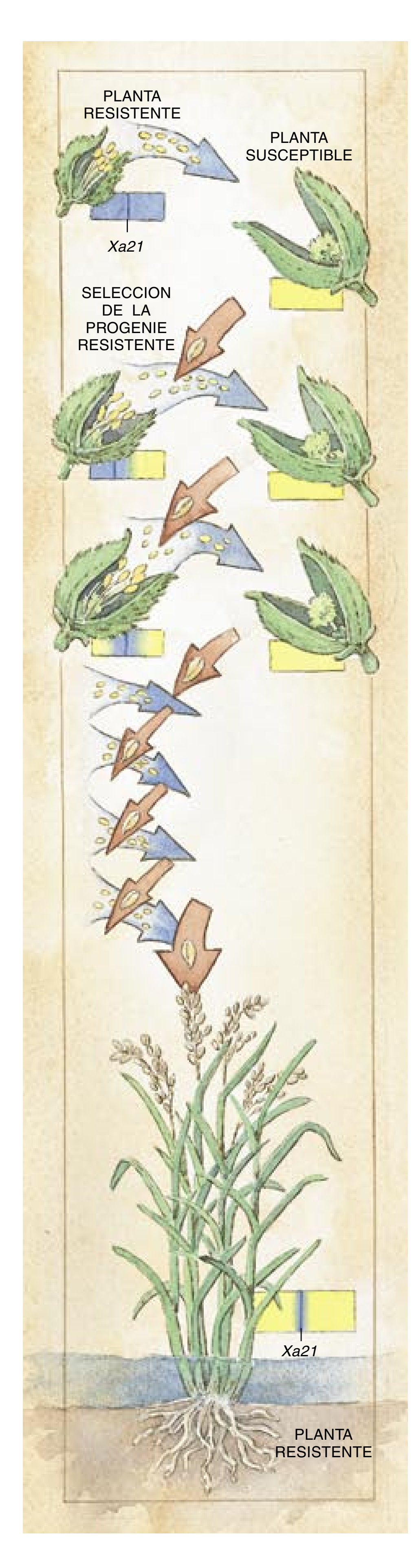
La historia del primer gen de resistencia clonado comienza en los países en vías de desarrollo. *Oryza longistaminata* es una especie silvestre de arroz originaria de Malí. Por su sabor amargo y su bajo rendimiento no sirve para el cultivo. Opone, sin embargo, una tenaz resistencia a la agresión de la seca. En 1977 se sometió a prueba en la India la tolerancia de esta planta ante las infecciones y se observó que sobrevivía a cualquier cepa de *Xoo* con la que se la enfrentara.

Un año después, Gurdev S. Khush y sus colaboradores, del Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz (IRRI) con sede en Filipinas, empezaron a trabajar con *O. longistaminata*. Se proponían transferir de la variedad silvestre a una variedad doméstica la resistencia a la marchitez. Y ello sin salirse de las técnicas tradicionales. Tras 12 años de mejora intensiva obtuvieron una variedad resistente, así como la certeza de que esta condición la confería una pequeña región de un cromosoma, quizás incluso un solo gen, que llamaron *Xa21*.

En 1990, cuando recogían los frutos de su trabajo, iniciaba yo mi carrera investigadora en la Universidad de Cornell. Decidida a desentrañar el mecanismo de resistencia a la marchitez bacteriana, me propuse clonar el gen *Xa21* a partir de la variedad del IRRI. Un gen de este tenor es un segmento corto de ADN que cifra una proteína y, a menudo, por tanto, un rasgo distintivo (la resistencia a la seca, por ejemplo). Pese a que solemos estudiar caracteres en individuos, no es fácil abordar genes específicos en el genoma de un organismo. Ni podemos aplicar la ingeniería genética sin genes aislados. Hay que producir, pues, copias accesibles de genes mediante el proceso de clonación.

Para clonar *Xa21*, necesitaba identificar su situación exacta en el genoma, transferir este fragmento de ADN a una bacteria donde pudiera copiarse fácilmente, introducir las copias resultantes en plantas vulnerables y comprobar luego que el ADN insertado les había conferido resistencia a la marchitez. Cuando inicié mi trabajo, nadie había conseguido todavía clonar ningún gen vegetal de resistencia a las enfermedades, por más que ya se conocían muchos de ellos y se les explotaba en las prácticas tradicionales de mejora. Por aquel entonces, la ingeniería genética aplicada a la resistencia a las enfermedades tenía que salvar dos tipos de dificultades: encontrar los genes y trasladarlos de un sitio a otro.

Encontrar un gen en un genoma viene a ser como hallar una aguja en un pajar, con el añadido de que los genomas de la mayoría de las plantas son pajares muy grandes. En coherencia con la metáfora, resulta más difícil localizar un gen en un genoma grande que en uno pequeño. Además, cuesta manipular los genomas grandes. A modo de criterio de referencia, tomemos el genoma de la bacteria *Escherichia coli*, pequeño y del que se aíslan genes sin extraordinaria dificultad. Comparado con ese patrón, el volumen de la información genética del arroz viene a centuplicar el de la bacteria, lo que convierte en un auténtico reto la “caza génica” en esta especie. Dar con el gen *Xa21* podría requerir



varios años y el concurso de técnicas refinadas.

Pese a ello, me podía considerar afortunada. Cuando se trata de aislar genes de otros cereales los escollos a superar son aún mayores. Sin ir más lejos, el genoma del trigo, que quintuplica el tamaño del genoma humano, es casi 3500 veces el de *E. coli*. En resumen, la clonación de genes de cereales —sea arroz o trigo— resulta en extremo complicada si no disponemos de un conocimiento previo de su posición o de su secuencia.

En 1990 me di cuenta de que era el momento adecuado para la clonación de genes de arroz. Estaba yo enrolada en el laboratorio de Steven D. Tanksley, de la Universidad de Cornell. Bajo su dirección y la de Susan R. McCouch, se había producido un avance clave: un mapa para guiar mi exploración por el vasto genoma de ese cereal. El tipo de técnica que utilicé se conoce como clonación a partir del mapa; como su nombre indica, requiere algún conocimiento de la situación de "señales indicadoras", o marcadores, en el ADN. El mapa genético elaborado por el grupo de Cornell mostraba la ubicación de cientos de marcadores útiles en los 12 cromosomas del arroz.

Durante unos años, primero en Cornell y después en la Universidad de California en Davis, mis colegas y yo nos hemos servido del mapa para acorralar a *Xa21*. En el curso de nuestra investigación hemos examinado más de un millar de pies para comprobar con qué frecuencia los marcadores de ADN conocidos aparecían asociados a la resistencia a la marchitez. Esta estrategia se apoya en los procesos de redistribución e intercambio cromosómico que ocurren durante la reproducción sexual: cuanto más próximos entre sí se hallen dos segmentos en un cromosoma, menor probabilidad tienen de quedar separados uno del otro en el proceso de recombinación. En nuestro caso, ese principio se traducía en lo siguiente: cuanto más a menudo observáramos la transmisión, a la descendencia, de la resistencia en unión con un marcador determinado, más cerca de este marcador se hallaría el gen de la resistencia.

Nos acompañó la suerte. La primera señal indicadora cromosómica que mi grupo y yo identificamos como contigua a *Xa21* resultó ser de una increíble utilidad. Cierto fin de semana de mayo de 1994, cuando hacía dos años ya que regía mi propio laboratorio en Davis, descubrí que la secuencia del ADN marcador recordaba a la de otros genes de resistencia a las enfermedades en plantas de tabaco, tomate, lino y mostaza, clonados por entonces. Aquella mañana de domingo me encontraba sola en el laboratorio. Llamé a John Salmeron, un viejo compañero que estaba en Berkeley, donde yo me había formado, y le pedí que comparara detenidamente mi secuencia con la de su gen de resistencia a las enfermedades del tomate. Nos quedamos atónitos ante el estrecho parecido entre genes de plantas tan diferentes. Sin duda, andaba yo rondando por el entorno adecuado.

Mi grupo y yo pasamos el año siguiente clonando posibles genes *Xa21* y preparándolos para su inserción en plantas de arroz. Sabíamos que la prueba crucial llegaría cuando transfiriéramos el ADN que habíamos aislado a una planta que, en condiciones normales, sucumbiría ante el ataque de *Xoo*. Si habíamos clonado el gen correcto, los ejemplares transgénicos resultantes opondrían resistencia a la marchitez bacteriana. Quedaba todavía un obstáculo serio: carecíamos de experiencia en introducir genes dentro de células de arroz. Por aquellas fechas se contaban con los dedos de la mano los laboratorios capacitados para acometer ese proceso de transformación.

La transferencia de genes a células vegetales es la segunda barrera a la que ha de hacer frente la bioingeniería aplicada a la resistencia contra las enfermedades. Muchos tipos de células vegetales, incluidas las del arroz, son refractarias a la absorción de ADN foráneo. Pero se dio un salto decisivo en 1987, cuando John

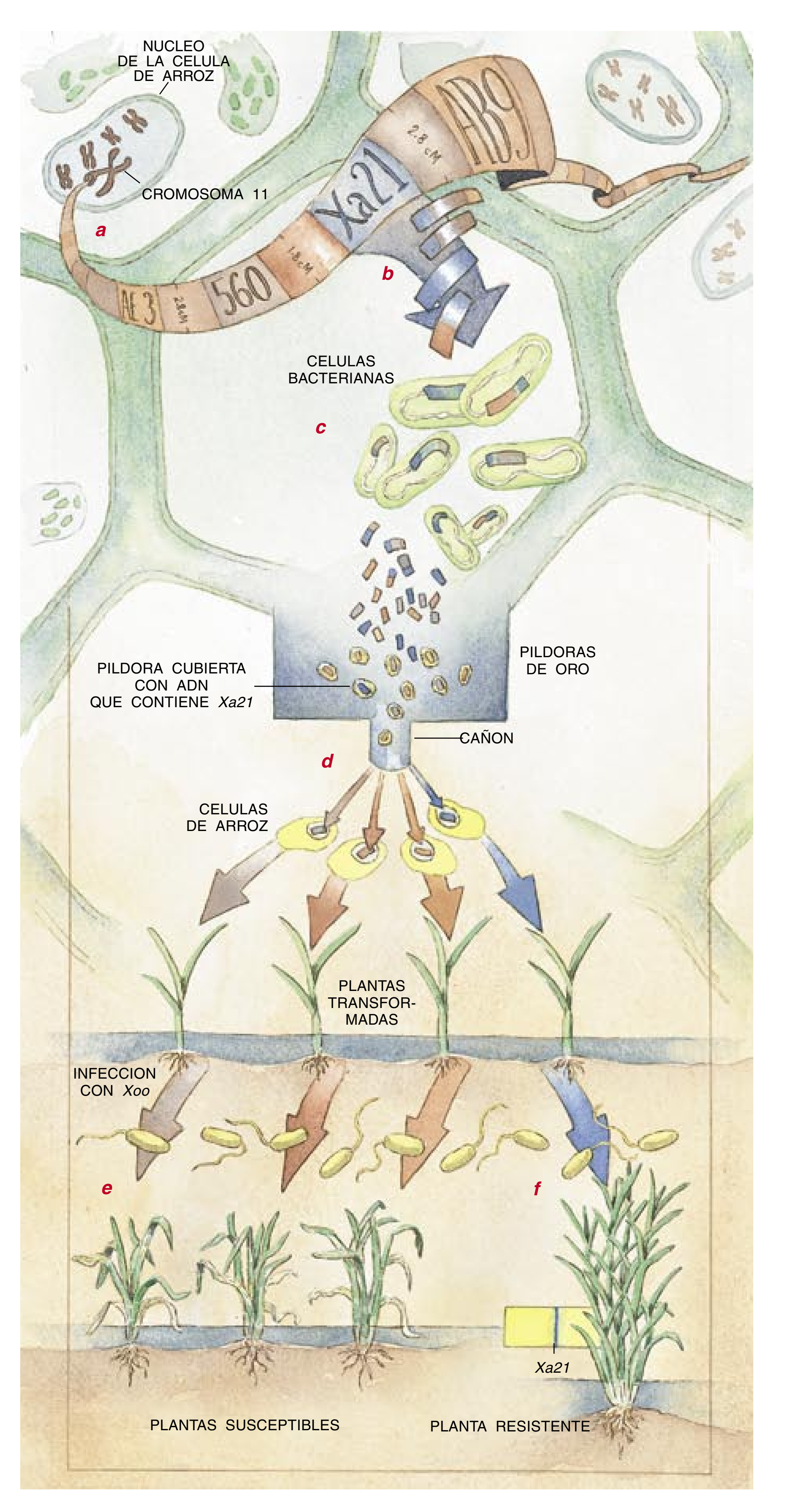
2. MEJORA TRADICIONAL, o método empleado durante años para producir arroz resistente a las enfermedades. El polen de una planta resistente fecunda el ovario de una planta que, si bien sucumbe a la agresión de la marchitez bacteriana, está dotada de otros rasgos deseables; por ejemplo, produce grandes cosechas de cereal o tiene buen sabor. La progenie hereda una mezcla aleatoria de material genético de ambos progenitores (*barras de color*). Se vuelve a cruzar la progenie resistente con la planta susceptible, dotando a la descendencia con otros rasgos valiosos de sus progenitores. La selección de una progenie resistente en cada cruce asegura la presencia continua del gen de resistencia; en este caso, el *Xa21*.

C. Sanford, de Cornell, desarrolló un cañón que dispara partículas microscópicas contra células sin degradar. Los primeros modelos de Sanford tenían cargador de pólvora; los modelos más modernos son de helio y perlas de oro. Estas píldoras, cuyo diámetro no llega a la centésima de milímetro, se revisten de ADN, que portan directamente hasta el interior de las células.

Hasta 1991 no se aplicó esa técnica al arroz. En las instalaciones del Laboratorio Internacional de Biotecnología Aplicada a la Agricultura Tropical (ILTAB) lo habían convertido en un proceso rutinario por la fecha en que nos disponíamos a someter a prueba un clon de *Xa21*. Tuvieron a bien ayudarnos.

Los investigadores del ILTAB utilizaron el cañón para transformar células de arroz de la variedad Taipei 309 con nuestro ADN clonado. Aunque se trataba de una variedad que ya no se cultiva, la elegimos porque se presta muy bien a la transformación y sucumbe ante el ataque de *Xoo*. Cultivamos 1500 plantas procedentes de células transformadas. Cada pie portaba algo de ADN clonado en sus células. Cumplidas las seis semanas de vida, era el momento de probar la resistencia del plantón frente a la marchitez bacteriana.

Para someter nuestras plantas transgénicas a la acción bacteriana, recortamos las hojas con unas tijeras que habíamos sumergido en una suspensión de *Xoo*. Diez días después, buscamos señales de lesiones producidas por las bacterias. De las 1500 plantas transgénicas originales, 50 habían opuesto una tenaz resistencia a la infección por *Xoo*, pues el daño observado oscilaba entre el 25 y el 10 % de lo padecido por las plantas sensibles originales. En estos 50



3. LA INGENIERIA GENETICA de resistencia a enfermedades requiere el aislamiento de genes que confieren dicho carácter. Para aislar el gen *Xa21*, la autora determinó su posición aproximada en el cromosoma 11 (*a*); después, multiplicó fragmentos de ADN que incluían dicha región (*b*). A continuación, se copió el ADN en bacterias (*c*). Las réplicas cubrieron la superficie de píldoras de oro que se dispararon dentro de células de plantas de arroz susceptibles a la enfermedad (*d*). Algunas células aceptaron el ADN foráneo, pero no el gen de la resistencia (*e*); otras, sin embargo, recibieron el *Xa21* intacto y crecieron para convertirse en plantas resistentes (*f*).

ejemplares, el fragmento de ADN transformado contenía un gen de resistencia a la seca intacto.

En conclusión: habíamos logrado la clonación de *Xa21*. Más tarde averiguaríamos que el gen se transmitía mediante autofecundación a las generaciones siguientes. Aparecían así plántulas resistentes a la marchitez bacteriana. Pusimos a prueba la resistencia de nuestras plantas transgénicas ante 31 cepas de *Xoo* diferentes; procedían de ocho países que se extendían de Asia a Colombia. Opusieron resistencia a la infección desencadenada por 29 de estas cepas; más: duplicaron la capacidad de resistencia a enfermedades que poseía su antepasado silvestre, africano. Por fin se había conseguido manipular el genoma del arroz para proteger la planta de la marchitez bacteriana.

Nos hemos centrado ahora en la inserción del gen *Xa21* en variedades que revistan interés agrícola. (Lo que no era el caso de Taipei 309.) Con la ayuda del ILTAB hemos introducido ya el gen *Xa21* en dos variedades populares —IR64 e IR72— que ocupan aproximadamente nueve millones de hectáreas de cultivo en Asia y Africa. Por lo que sabemos, esas plantas transgénicas oponen resistencia a la seca. También hemos introducido ese carácter en Ming Hui 63, una variedad de gran consumo en China.

Ante ese presente prometedor, he enviado copias del gen *Xa21* a expertos de Europa, Africa, Asia y Norteamérica, para que introduzcan la resistencia a la marchitez bacteriana en sus variedades arroceras locales. Las condiciones de cultivo varían de un lugar a otro; por eso, los agricultores prefieren plantar la variedad que saben que prende mejor en sus campos, es decir, que tolera mejor sequía, fríos, vientos (talla pequeña) y enfermedades o plagas del lugar. Las razas mejoradas mediante ingeniería genética sólo diferirán de la planta original en que portan el gen clonado que les confiere protección frente a la marchitez bacteriana.

Una vez creada la nueva raza, debe experimentarse con ella en el campo para sopesar el rendimiento, sabor y dureza que confirme que los rasgos ventajosos de su precursora permanecen intactos. En los próximos años, investigadores de California, Asia y Africa plantarán en campos experimentales arroz transgénico que porte el gen *Xa21*. Si el comportamiento de estas líneas no desmerece del obtenido por las variedades adaptadas localmente, los programas nacionales de mejora distribuirán las semillas a los agricultores de países en vías de desarrollo. Dado que el transgén de la resistencia a enfermedades se transmite a la progenie, los agricultores podrían cultivar sus propias semillas para la temporada siguiente.

Comparada con la mejora tradicional, la ingeniería genética es rápida y flexible: podemos traspasar genes entre plantas en cuestión de meses. El donante y el receptor no tienen que ser necesariamente compatibles para la reproducción; podemos repartir genes entre especies dispares, incluso entre tipos diferentes de cultivo.

Se trata, pues, de que los expertos puedan llegar a aprovechar los genes de resistencia clonados para controlar patologías en muchas plantaciones, no sólo de arroz. Por ejemplo, las especies de *Xanthomonas* que causan la marchitez infectan a casi todas las variedades agrícolas. En Florida, el 99 % del cultivo de cítricos se resiente de su ataque, y los agricultores se ven obligados a controlar de cerca las infecciones bacterianas para prevenir epidemias. A mediados de los años ochenta se quemaron más de 20 millones de naranjos para frustrar un posible brote de esta enfermedad. Los expertos en mejora podrían algún día proteger los cítricos y otros cultivos lucrativos mediante la manipulación de los genes de resistencia frente a la marchitez bacteriana del arroz y la transferencia de éstos a especies sensibles.

La ingeniería genética podría también ayudar a afrontar los problemas que encuentra una planta resistente a las enfermedades, una vez sembrada. Los patógenos pueden mutar y debilitar la protección que confiere un determinado gen de resistencia. Los mejoradores deben, por tanto, identificar continuamente e introducir genes útiles para minimizar la



4. LAS HOJAS DE ARROZ expuestas a *Xoo* resisten la infección cuando el gen *Xa21* está presente, tanto en la variedad transgénica Taipei (*par de la izquierda*) como en las plantas mejoradas por métodos tradicionales (*par de la derecha*). En las hojas infectadas de plantas susceptibles aparecen lesiones amarillentas (*pares del centro*).

PAMELA C. RONALD enseña en la Universidad de California en Davis. Desde la preparación de su tesis doctoral, se ha dedicado a la aplicación de la ingeniería genética en los procesos de mejora vegetal.

vulnerabilidad a una enfermedad. En ese empeño han de emplear métodos tradicionales y de ingeniería genética. Por suerte, se conocen muchos genes de resistencia y están listos para su clonación. La combinación de estos genes podría redoblar la defensa ante patologías, a la manera en que las combinaciones de antibióticos o medicamentos antivíricos combaten la bacteria de la tuberculosis o el virus de la inmunodeficiencia humana.

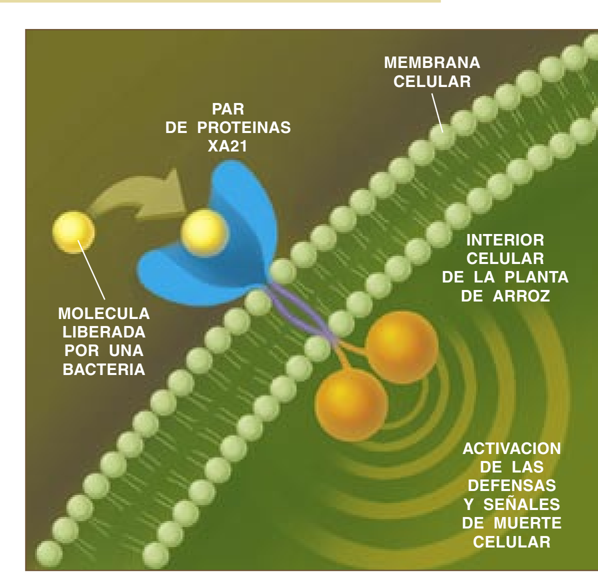
Confiamos, además, en incorporar la protección contra más de un patógeno en una misma línea transgénica. Ocurre a veces que los campesinos no pueden sembrar razas seleccionadas por su resistencia contra la marchitez porque son vulnerables a otros patógenos y plagas. De particular agresividad es el saltamontes pardo, un insecto que causa serios daños a las plantas de arroz, su fuente alimentaria. Además, es vehículo transmisor del virus del enanismo cespitoso y el virus del raquitismo áspero. En un ensayo pionero por el que nos proponemos domeñar la resistencia a múltiples amenazas, estamos colaborando con expertos de China e Inglaterra para incorporar resistencia tanto a la marchitez bacteriana como al saltamontes pardo en variedades importantes de arroz, utilizando genes clonados, incluido el *Xa21*. Conforme se eleve el número de genes de resistencia que se clonen, crecerá exponencialmente el número de combinaciones disponibles.

Disparo de la alarma

¿Cómo notan las plantas resistentes a la marchitez la presencia de los intrusos bacterianos? En nuestra opinión, la proteína que cifra *Xa21* actuaría a modo de receptor. Los pares de proteínas XA21 ocuparían de parte a parte la membrana celular, captando señales externas enviadas por las bacterias y retransmitiéndolas hacia el interior de la célula. Se originaría entonces una respuesta de protección: la célula alertada avisaría a sus vecinas para que organizaran la defensa, y moriría después. La acumulación de células muertas evitaría la propagación del invasor. La porción anteniforme de la proteína, que da al exterior celular, se parecería a proteínas animales que reconocen y traban otras moléculas. Pese a una tenaz búsqueda, no hemos encontrado todavía la molécula bacteriana que alerta a las células de arroz de la presencia de su enemigo.

La porción de proteína del interior de la célula de arroz recordaría las quinasas, un tipo común de enzima responsable de estimular la "entrada en acción" de las células. La enzima, pensamos, se activaría en respuesta a la señal bacteriana, pregonando por toda la célula un mensaje de alerta.

—*P.C.R.*



LA PROTEINA XA21 parece constar de tres partes: una sección que detecta señales procedentes de bacterias (*azul*), otra que atraviesa la membrana de la célula (*morado*) y una tercera que genera un mensaje en el interior celular (*naranja*).

Las plantas transgénicas resistentes a las enfermedades encierran un prometedor futuro comercial. Aunque el arroz así mejorado no se cultive todavía, en los anaqueles del mercado se venden ya otros productos transgénicos. El tomate "Flavr Savr", preparado por Calgene para prolongar su tiempo de almacenamiento, fue el primer fruto de la manipulación vegetal que se abrió camino en el comercio. La soja resistente al herbicida Roundup apareció en el mercado en 1996; y recientemente se ha aprobado la venta en Canadá y Estados Unidos de maíz manipulado para tolerar herbicidas.

Los campesinos del Tercer Mundo no pueden permitirse técnicas que requieran el suministro de herbicidas caros, pero las variedades transgénicas resistentes les resultarán, también a ellos, sumamente útiles. Estos cereales disfrutarían incluso de una mayor aceptación que otros productos transgénicos (así, las plantas sintetizadoras de insecticida, que algunos temen insten la aparición de insectos resistentes a los insecticidas).

Andando el tiempo, las plantas transgénicas resistentes a las enfermedades pueden ejercer un efecto decisivo sobre la economía agraria, al promover una mayor eficacia en el aprovechamiento de la tierra de cultivo, un mejor suministro global de alimentos y métodos de control de plagas y enfermedades más respetuosos con el entorno.

La esperanza de comercialización de productos transgénicos resistentes a enfermedades entraña un compromiso social. En 1996 Davis estableció el Fondo para el Reconocimiento de los Recursos Germoplasmáticos con el fin de testimoniar la aportación de las naciones en vías de desarrollo al éxito de los programas de investigación, incluido el del gen *Xa21*, por el que se ha cursado una solicitud de patente. Financiado por ingresos procedentes de la comercialización de materiales genéticos obtenidos en el Tercer Mundo, el fondo ofrecerá becas de apoyo para investigadores procedentes de naciones desfavorecidas. Los agricultores de estas regiones pobres podrán obtener semillas de nuestras líneas transgénicas al mismo coste que las líneas parentales tradicionales.

El potencial de la ingeniería genética en arroz y otros cereales no se agota con la resistencia a las enfermedades. Con el tiempo se irán clonando muchos más genes responsables de otros rasgos de interés (resistencia al frío o a la sequía). Y a la larga, mejoradores y campesinos podrán elegir, de entre un variadísimo repertorio genético, los genes que les permitan cosechar más de lo que siembran.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MOLECULAR GENETICS OF PLANT DISEASE RESISTANCE. B. J. Staskawicz *et al.* en *Science*, vol. 268, páginas 661-667; 5 de mayo de 1995.

A RECEPTOR KINASE-LIKE PROTEIN ENCODED BY THE RICE DISEASE RESISTANCE GENE, *Xa21*. Wen-Yuan Song *et al.* en *Science*, vol. 270, páginas 1804-1806; 15 de diciembre de 1995.

SIGNALING IN PLANT-MICROBE INTERACTIONS. B. Baker *et al.* en *Science*, vol. 276, págs. 726-733; 2 de mayo de 1997.

Biología de la rizosfera

En la rizosfera, zona restringida de suelo que rodea a las raíces, se estimula la diversidad y actividad de los microorganismos. Constituye, además, un factor clave en la productividad del medio

José Miguel Barea

En el suelo, medio natural para el desarrollo de las plantas, habita una comunidad diversa y compleja de algas, bacterias y hongos. Estos microorganismos, junto con los virus y los componentes de la microfauna (amebas, artrópodos, flagelados, nemátodos y otros), forman la *microbiota* del suelo. Y aunque se estima que existen unas 30.000 especies de bacterias y 1.500.000 de hongos, sólo se han identificado un 8 % y un 1 %, respectivamente.

Las partículas minerales y orgánicas, constituyentes de la fase sólida del suelo, se asocian en agregados. En la superficie de las partículas, en el interior de los agregados o asociados a las raíces, los microorganismos hallan nichos adecuados para desenvolverse. Ese conjunto queda inmerso en la atmósfera del suelo y en su solución acuosa.

La actividad y diversidad de la microbiota, amén de condicionar la fertilidad del suelo, determinan la estabilidad y funcionamiento de ecosistemas naturales y agroecosistemas. La diversidad microbiana es esencial para garantizar los ciclos de los nutrientes y los fenómenos de descomposición de material vegetal en cualquier ecosistema terrestre. En un gramo de suelo pueden existir decenas de millones de microorganismos. Sin embargo, la disponibilidad de nutrientes asimilables, particularmente de substratos carbonados metabolizables, es baja. Por ello la mayoría de los microorganismos suelen hallarse inactivos desde el punto de vista fisiológico.

Ahora bien, cuando se introducen plantas en el sistema, la situación de los microorganismos cambia de forma drástica. Las plantas son las principales suministradoras de substratos energéticos al suelo. Para definir la nueva situación, Lorenz Hiltner introdujo en 1904 el término rizosfera, que designaba el volumen de suelo que rodea a las raíces y que resulta afectado por el desarrollo de éstas.

Se calcula que el suministro de compuestos orgánicos a la rizosfera es de entre 50 y 100 mg de materia orgánica por gramo de raíz. En contrapartida, los microorganismos desarrollan en la rizosfera actividades metabólicas de las que se benefician las plantas. El conjunto de interacciones que se establecen recibe el nombre de efecto rizosférico. La estimulación de los microorganismos en la rizosfera en virtud del efecto rizosférico se cuantifica en términos de la relación R/S, es decir, la razón entre el número de microorganismos presentes en el suelo rizosférico y los que viven en zona libre de raíces, en zonas próximas a la planta. Tal efecto comienza a manifestarse justo después de la germinación de las semillas, para alcanzar su máximo durante la floración y fructificación. En la senectud de la planta, el efecto decrece de un modo acelerado. Las poblaciones de microorganismos en la rizosfera alcanzan cifras de cientos de millones de células por centímetro cúbico, densidad que resulta unas 10 a 1000 veces mayor que la del suelo no rizosférico.

El aporte de compuestos carbonados solubles e insolubles, responsable del efecto rizosférico, ocurre en forma de exudados o lisados que se liberan de las células, vivas o muertas, de la raíz. Son también substrato microbiano los fragmentos de tejidos y células de la cofia, epidermis y corteza que se desprenden de la raíz en crecimiento subterráneo y otros restos vegetales. Los sitios de mayor exudación son la zona de crecimiento activo de la raíz (1-3 cm del ápice), los extremos de las raíces laterales y los pelos radicales.

Pero la exudación dista de la uniformidad. La liberación de substratos al suelo es superior en las uniones longitudinales de las células. La cantidad de substratos solubles exudados se cifra en 1-10 % del peso de la raíz, aunque en ocasiones se alcanzan valores de hasta el 25 %. Los exudados, dependiendo de la especie, estadio fisiológico y edad de la planta, medio de cultivo, condiciones ambientales, etcétera, contienen cantidades variables de aminoácidos, péptidos, proteínas, vitaminas, enzimas, azúcares, polisacáridos, ácidos orgánicos, flavonoides y hormonas.

Sobre la superficie de la raíz (*rizoplana*) se desarrollan colonias microbianas que a veces están embebidas en el mucigel, capa mucilaginosa que rodea a la raíz. En la rizoplana las bacterias se encuentran rodeadas de su propia cápsula polisacarídica, que con el tiempo pasará a formar parte integrante del mucigel. En raíces desarrolladas en ausencia de microorganismos la capa de mucigel alcanza un grosor de unos 0,5 mm, aunque en la cofia puede llegar a medir 2,5 mm. Sin embargo, en presencia de microorganismos, el espesor de la capa se incrementa hasta unos 8 mm, señal de que buena parte de este material lo producen los propios microorganismos.

JOSE MIGUEL BAREA es profesor de investigación en el departamento de microbiología del suelo y sistemas simbióticos de la Estación Experimental del Zaidín, Instituto del CSIC en Granada, del que es director desde 1989. Sus investigaciones en biología de la rizosfera, que comenzaron hace 30 años, están orientadas al estudio de los microorganismos rizosféricos en relación con la biología y ecología de las plantas en agroecosistemas y ecosistemas naturales.

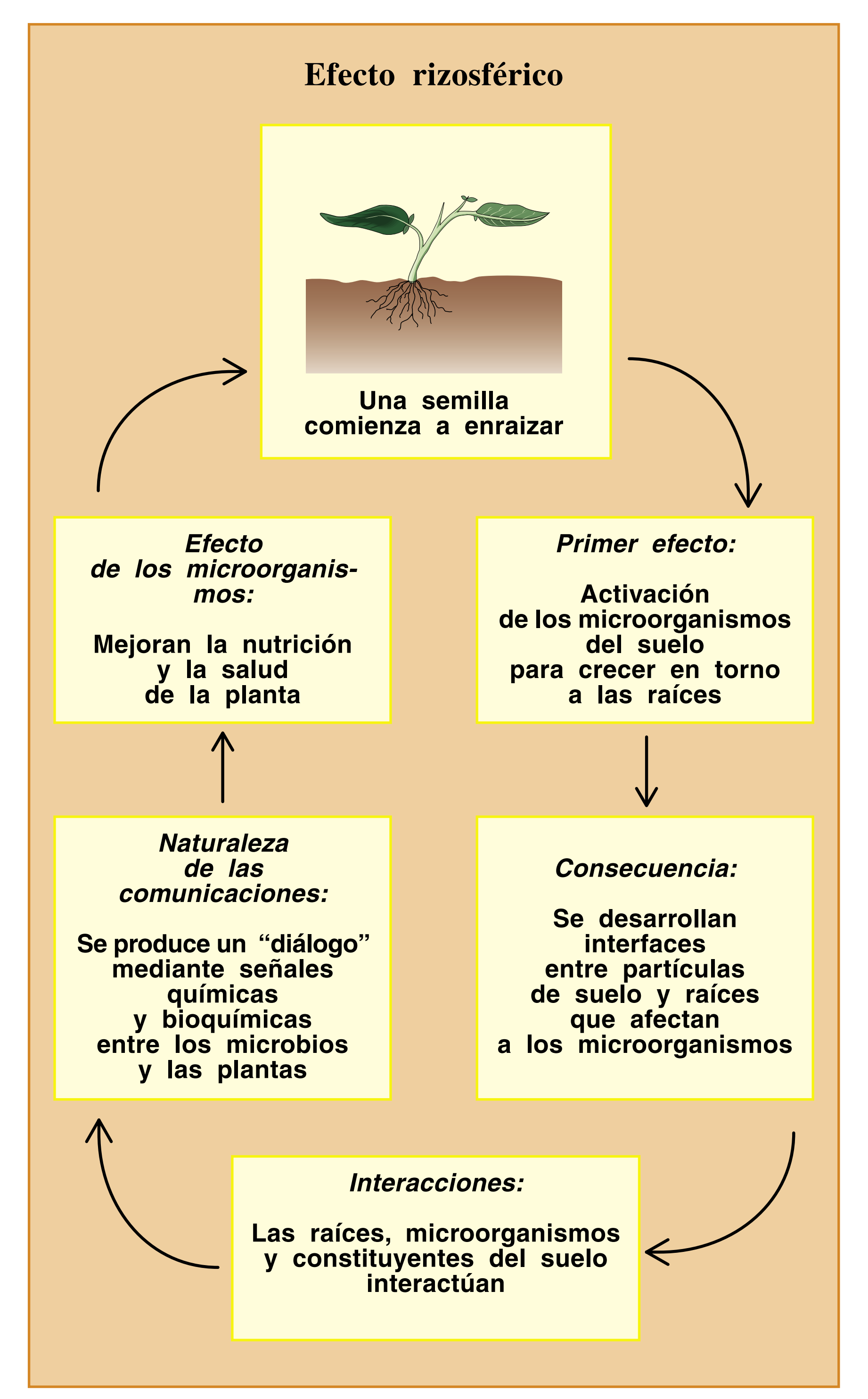
La microbiota puede utilizar el mucigel como fuente de energía y nutrientes. Lo haga o no, ocupa siempre una posición de privilegio para el aprovechamiento de los exudados radicales y, en toda circunstancia, este material mucilaginoso actúa como protector. Cuando las raíces comienzan a envejecer, las células de la corteza inician un proceso de autolisis, por lo que el límite entre rizosfera externa y rizoplana pierde definición.

La liberación de substratos orgánicos por las raíces es superior cuando las plantas crecen en presencia de microorganismos, que cuando lo hacen en condiciones axénicas (en ausencia de microorganismos): se ha comprobado que el porcentaje de carbono procedente del fotosintato, liberado al suelo en presencia de microorganismos, era del 12-18 %; en condiciones axénicas era del 5-10 %. Para compensar ese drenaje de compuestos carbonados, los microorganismos aportan a la planta nutrientes y, sobre todo, estimulan la fotosíntesis, con el consiguiente incremento de la producción de compuestos carbonados por el vegetal.

Según parece, el incremento de la exudación en presencia de microorganismos se debe a la lisis de las células vegetales. Se han avanzado dos razones adicionales. En primer lugar, la absorción de exudados por una microcolonia podría provocar la difusión de los mismos de acuerdo con el gradiente de concentración que se crea; en segundo lugar, la producción local de compuestos que incrementan la permeabilidad celular facilitaría la exudación.

Bacterias y hongos penetran en el interior de los tejidos radicales a través de las paredes de las células epidérmicas o de heridas ocasionales. Tal invasión microbiana puede afectar a toda la corteza de una raíz y a los microorganismos, *endofitos*. Ejemplos típicos de colonización de la corteza de la raíz por microorganismos, aparte de la invasión saprofítica o parasítica, es la llevada a cabo por los hongos de las micorrizas y por *Azospirillum* en gramíneas.

El tamaño de la población microbiana en la rizosfera viene determinado por la intensidad de enraizamiento de la planta, el ritmo de germinación de propágulos microbianos en el suelo y el de su desplazamiento hacia la raíz, así como por la velocidad de crecimiento de las microcolonias, que, a su vez, depende de los substratos solubles presentes. Sólo el 4-15 % de la superficie de la rizoplana se halla cubierta por microorganismos, excepto en el caso de las ectomicorrizas, en las cuales pequeñas raíces laterales pueden estar totalmente protegidas por el manto del hongo. La distribución de ese 4-15 % de la superficie no es aleatoria; existen sitios preferenciales de colonización en las uniones de las células. De otra parte, como las raíces crecen a mayor velocidad que las colonias microbianas, las nuevas raíces de-



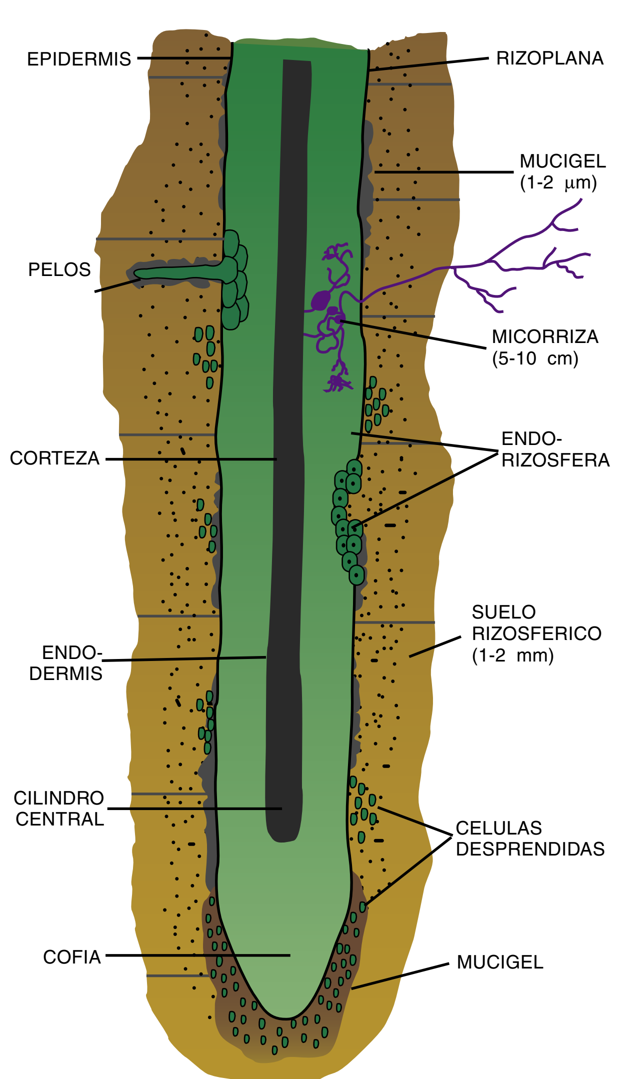
1. CON LA GERMINACION de la semilla se inicia el efecto rizosférico, que consiste en la estimulación de los microorganismos del suelo y el desarrollo de interacciones entre microbios, raíces y partículas de suelo. El resultado de muchas de tales interacciones se traduce en un beneficio neto para la planta y el ecosistema.

ben colonizarse a partir de propágulos del suelo.

El desplazamiento de los microorganismos hacia la raíz depende del tamaño del propágulo y de las reservas que contiene, así como de su dinámica de población. Y así, lo mismo que en otros dominios de la ecología, percibimos aquí dos tipos de estrategias de colonización: *r* y *K*. Los microorganismos que siguen la estrategia de la *r* son oportunistas, de pequeño tamaño, con rápido ritmo de crecimiento y colonizan nuevos nichos. En contraste, los que siguen la estrategia de la *K* son de gran tamaño, más longevos y con alta capacidad competitiva.

La migración bacteriana hacia las raíces se favorece por la presencia de agua libre en el suelo. En ausencia de agua, la colonización inicial de una nueva raíz ocurrirá por contacto con alguno de los muchos propágulos breves (estrategia de tipo *r*), fundamentalmente bacterias y hongos de pequeñas esporas con capacidad de germinar y crecer muy deprisa sobre substratos sencillos. Los organismos que siguen la estrategia de la *K* están más adaptados a crecer y aproximarse a las raíces desde mayores distancias, por lo que pueden ser los principales encargados de la colonización tardía.

Toda la materia orgánica producida por las plantas se halla, en potencia, disponible para los microorganismos heterótrofos, aunque no toda es utilizable. Es más, la presencia de material energético metabolizable es discontinua en el tiempo y en el espacio. Durante largos intervalos, los microorganismos sufren la escasez de substratos orgánicos, por lo cual se mantienen con un bajo ritmo de crecimiento y metabolismo. El crecimiento microbiano en el suelo no rizosférico es muy lento y a los períodos de actividad siguen largos períodos de inactividad.



2. LA RIZOSFERA no es una región bien definida y homogénea; antes bien, existe un gradiente de estimulación de microorganismos desde la propia superficie de la raíz hasta unos 1-2 mm, donde ya el efecto es mínimo. Podemos dividir la rizosfera en las zonas siguientes: (*a*) rizosfera externa o suelo rizosférico, que comprende la región del suelo que rodea la raíz, en íntimo contacto con ella, y que contiene poblaciones estimuladas de microorganismos; (*b*) rizoplana, que es la propia superficie de la raíz y los microorganismos que viven en ella; (*c*) endorrizosfera, que se forma cuando el tejido cortical de la raíz es invadido y colonizado por microorganismos saprofíticos y simbióticos.

En el suelo rizosférico, sin embargo, los microorganismos pueden aprovechar los substratos para multiplicarse o para mantener las poblaciones existentes. En el segundo caso se consigue una biomasa de microorganismos permanente superior, mientras que en el primero se produce mayor cantidad de material microbiano nuevo. Una elevada biomasa o una elevada productividad son, por tanto, situaciones alternativas con diferentes implicaciones en biología de la rizosfera, puesto que algunos efectos de los microorganismos están relacionados con su ritmo de crecimiento.

Si los substratos se destinan al crecimiento activo, puede haber competición por el fósforo entre plantas y microorganismos; si se reservan para el mantenimiento, no habrá inmovilización neta de P. Sin embargo, ninguno de estos dos extremos —todo el substrato usado para el crecimiento, o todo para el mantenimiento— es una descripción realista de lo que ocurre en la rizosfera. Cuando un nuevo segmento de raíz comienza a exudar, prosperan las poblaciones de la rizosfera. Si el ritmo de crecimiento se mantiene constante, la población microbiana se incrementará exponencialmente y requerirá un incremento exponencial de aporte de substratos.

Pero la liberación de substratos no puede mantener el crecimiento durante mucho tiempo; con la reducción del ritmo de crecimiento aumentará la proporción de substrato utilizado para el mantenimiento. Quedan, no obstante, muchas cuestiones abiertas. ¿Cuáles son los ritmos específicos de crecimiento en la rizosfera? ¿Cómo varían las poblaciones y su tasa de crecimiento con la distancia hasta la raíz? ¿Hay cantidades importantes de substratos en la solución de la rizosfera? Para responder a estas cuestiones, se han sucedido estudios experimentales y desarrollado modelos matemáticos.

Al principio el crecimiento microbiano es rápido, decrece con el tiempo y cesa a los pocos días del inicio de la exudación, a una distancia superior a 1 mm de la superficie de la raíz. La razón estriba en que la biomasa próxima a la rizoplana capta casi todo el material liberado, en tanto que resulta insuficiente, incluso para el mantenimiento de

las poblaciones, la cantidad que llega a las regiones más externas. Si consideramos un volumen de suelo que contenga numerosas raíces de la misma edad en exudación activa, se puede predecir la masa microbiana media de este suelo. La curva de crecimiento tiende hacia una asíntota; tras unos pocos días de exudación, el crecimiento incesante cerca de la raíz está casi equilibrado por la pérdida de biomasa más lejos y, por tanto, el incremento neto es pequeño.

Se dan en la rizosfera diversos tipos de interacción entre las diferentes comunidades de microorganismos, que se agrupan en dos formas generales: interacciones positivas y negativas. Un ejemplo de las primeras es el comensalismo, relación en la que el crecimiento de una especie se estimula por la presencia de otra. Lo observamos en las bacterias que reducen el potencial de óxido-reducción de un ambiente, mediante consumo de O_2: propician el establecimiento de poblaciones anaerobias. Ocurre comensalismo también en los microorganismos que convierten un substrato en formas utilizables por otros que carecen del sistema enzimático necesario para atacar el substrato original.

La protocooperación es una relación casual y no obligatoria para ninguna de las especies interactuantes, si bien resulta mutuamente beneficiosa. Un ejemplo típico de protocooperación nos lo ofrece la alimentación cruzada entre microorganismos auxótrofos (que dependen de que se les suministre un determinado aminoácido para crecer, mientras excretan otros que se producen en exceso y que utilizan microorganismos que son auxótrofos para éstos, y viceversa). El mutualismo se produce entre dos o más especies, de cuya interrelación ambas se benefician; acostumbra ser obligatorio y específico.

Entre las relaciones de tipo negativo destaca la competición, que es una lucha entre dos o más especies por conseguir algún elemento o condición ambiental esencial para su supervivencia. En la rizosfera se pugna por substratos carbonados, nutrientes minerales, factores de crecimiento, oxígeno, agua o espacio. El amensalismo es una interacción negativa en la que una población microbiana afecta adversamente el crecimiento de otra mediante la excreción de productos inhibidores. Existen diversas formas de amensalismo; las más comunes son la inhibición por sustancias inorgánicas, la antibiosis, fungistasis, bacteriostasis y ciertos tipos de lisis (saprofítica).

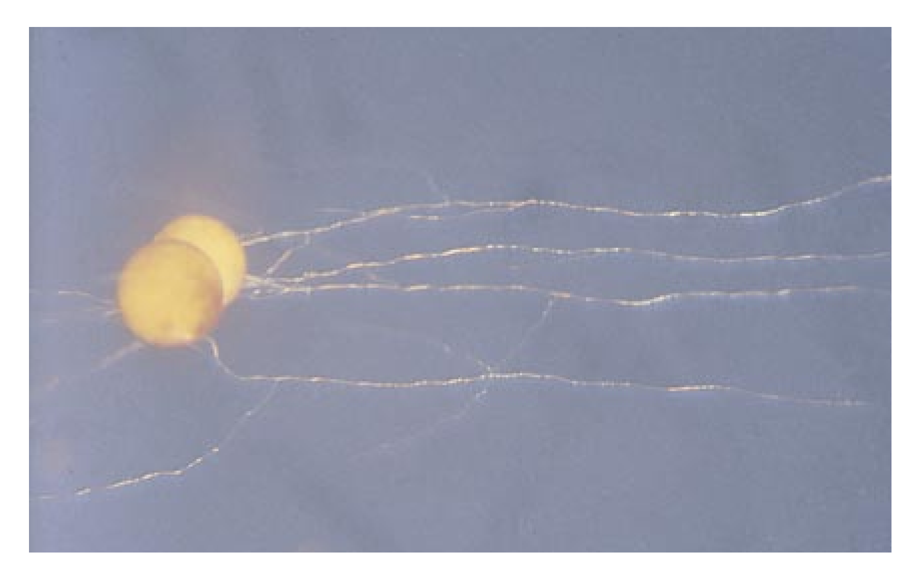
La predación y el parasitismo son también interacciones negativas. En la predación el atacante es de mayor tamaño que el atacado, situación que se invierte en el parasitismo. Hay una predación holozoica, con ingestión inmediata de la pieza, y una predación lítica, en cuyo caso los predadores emiten enzimas líticas que primero degradan la presa y posteriormente consumen los productos de la lisis. En el parasitismo, el elemento atacado (hospedador) permanece vivo, al menos durante cierto tiempo.

Desde el punto de vista de sus relaciones con la planta, los microorganismos del suelo pueden ser saprófitos, simbiontes parasíticos y simbiontes mutualistas. Los saprófitos utilizan, en "vida libre", compuestos orgánicos procedentes de residuos animales, vegetales o microbianos. Los simbiontes parasíticos infectan órganos de la planta causándole enfermedades. Por fin, los simbiontes mutualistas, o simplemente simbiontes, colonizan las raíces de las plantas donde encuentran compuestos carbonados; benefician el desarrollo y nutrición de la planta aportándole nutrientes minerales.

En el caso de la simbiosis mutualística se ha llegado a un grado de especialización tal, que existe obligatoriedad e interdependencia: aunque puedan vivir separados, determinadas actividades fisiológicas sólo pueden llevarlas a cabo en simbiosis. Las simbiosis mutualísticas son responsables de la fijación del nitrógeno y de las micorrizas. En su forma molecular, N_2 o dinitrógeno, existente en la atmósfera, no es directamente asimilable por los vegetales. Hay que secuestrarlo, fijarlo. Se entiende por fijación biológica de nitrógeno la reducción de este elemento a amonio, llevada a cabo por numerosos organismos, todos ellos bacterias que poseen y expresan la enzima nitrogenasa. El nitrógeno molecular se incorpora así en la biosfera para su aprovechamiento directo o indirecto por las plantas, según se trate de la fijación simbiótica o libre, respectivamente.

Los microorganismos fijadores secuestran casi la misma cantidad de N que pasa a la atmósfera por desnitrificación, con lo que se mantiene un equilibrio aceptable dentro del ciclo biogeoquímico de este elemento. Las bacterias implicadas en fijación simbiótica son *Rhizobium* (nombre genérico para esta bacteria y afines), *Frankia* (actinomiceto) y ciertas cianobacterias.

Llamamos micorrizas a la simbiosis mutualística entre determinados hongos y raíces. El hongo, una vez que alcanza la rizosfera, coloniza la corteza de la raíz y desarrolla un micelio externo que,



3. LAS ESPORAS DE LOS HONGOS son la forma natural de perpetuar la especie y de propagarla (propágulos) en el ecosistema. Cuando las esporas germinan, desarrollan unos filamentos: las hifas del hongo, que constituyen una red de micelio que se extiende en el suelo según su potencial saprofítico. Cuando las hifas alcanzan las proximidades de la raíz colonizan la rizosfera y establecen diversos tipos de relaciones con la planta, dependiendo de las características metabólicas y ecológicas de la especie y ecotipo del microorganismo.

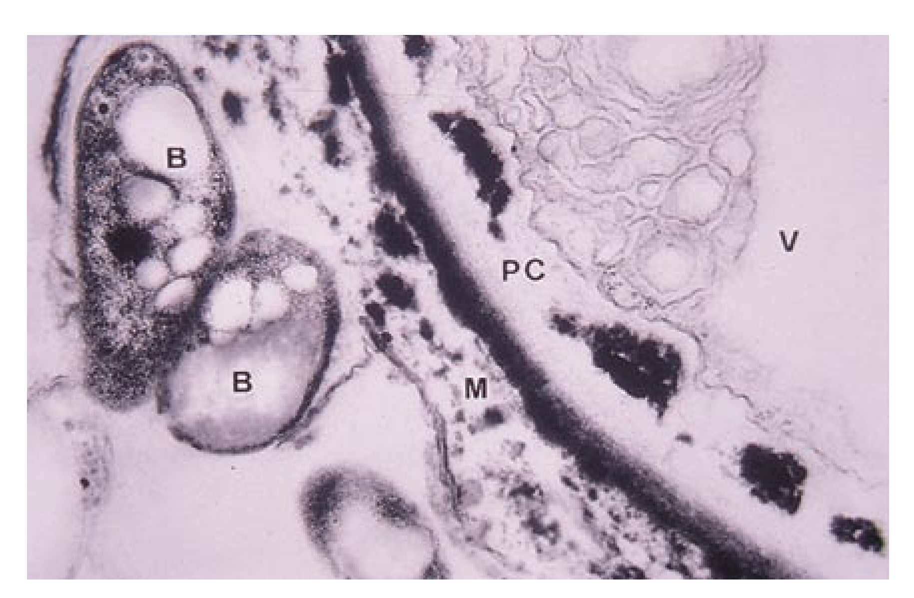


4. LA CAPTACION de nutrientes por las raíces exige que el ion correspondiente (fosfato, amonio, nitrato, sulfato, etc.) llegue a la rizosfera desplazándose por difusión o flujo pasivo desde el suelo no rizosférico. La microfotografía de B. Bago y C. Azcón, del CSIC, Granada, muestra que los hongos de la micorriza (filamentos más delgados) extienden la zona de captación de nutrientes a distancias superiores a las que actúan los pelos radicales (filamentos más gruesos) en cuanto a la absorción de elementos minerales.

a modo de sistema radical complementario, ayuda a la planta a adquirir nutrientes minerales y agua del suelo. La micorriza, que viene a constituir una extensión de la rizosfera, se considera el componente metabólicamente más activo de los órganos de absorción de nutrientes de las plantas. A su vez, la planta hospedadora proporciona al hongo simbionte, heterótrofo, nutrientes orgánicos y un nicho protector.

Los microorganismos de la rizosfera condicionan la formación y función de las micorrizas, mientras que el establecimiento de la simbiosis produce cambios cualitativos y cuantitativos en los exudados radicales de la microbiota. (Se produce entonces un nuevo equilibrio en el suelo en torno la raíz micorrizada, que se manifiesta con la constitución de la *micorrizosfera*.)

Entre los microorganismos saprofíticos destacan las rizobacterias, que se caracterizan por su capacidad para adaptarse, colonizar y persistir en la rizosfera. Cierta clase de ellas, las rizobacterias promotoras del crecimiento de la planta (o PGPR), aportan formas asimilables de los nutrientes minerales, producen fitohormonas o suprimen patógenos de la raíz.



5. BACTERIAS (*Rhizobium*) inmersas en el mucílago producido por las raíces. Esta microfotografía (× 41.040) obtenida al microscopio electrónico por M. Lucas y R. de Felipe, del CSIC, Madrid, ilustra un nivel de interacción íntimo bacteria-raíz. Los símbolos indican lo siguiente: PC, pared de la célula vegetal; B, bacteria; V, vacuola de la célula vegetal; M, mucigel.

Se acepta que el proceso de colonización de la rizosfera ocurre en dos fases. En la primera, las rizobacterias se adhieren a las raíces que empiezan a emerger. De ese modo, pasivamente, se dejan transportar y distribuir por rizoplana y suelo rizosférico. En la fase segunda, las bacterias se multiplican y crean microcolonias en sitios ricos en nutrientes. Estas dos fases son de hecho dos estadios del ciclo de vida de las bacterias más que una secuencia estrictamente temporal de eventos, ya que ambas ocurren simultáneamente en distintas partes del sistema radical. En la fase primera intervienen mecanismos inespecíficos, tales como fuerzas electrostáticas, y específicos, en los que participan glucoproteínas de la superficie de la raíz y exopolisacáridos bacterianos que están implicados en los fenómenos de adhesión a raíces y partículas del suelo.

Son múltiples los beneficios que aportan los microorganismos de la rizosfera a la planta. Los hay que tienen que ver con la germinación de las semillas y del enraizamiento. Otros, con la mayor disponibilidad de nutrientes. Los microorganismos mejoran, asimismo, la estructura del suelo y protegen al vegetal frente a tensiones de diversa índole. Además, la microbiota del suelo es un recurso natural renovable.

La degradación de ecosistemas naturales, que se manifiesta en la pérdida de la cubierta vegetal o en el descenso de la productividad agrícola, está asociada con cambios importantes en la calidad del suelo. Ello incluye la pérdida de la estructura, incremento de la erosión, carencia de nutrientes asimilables y materia orgánica, así como un descenso en la cantidad, diversidad y actividad de los propágulos microbianos capaces de colonizar la rizosfera. En efecto, los microorganismos del suelo son un indicador muy sensible para detectar la contaminación o degradación de ecosistemas; su diversidad en particular se resiente incluso ante cambios o perturbaciones leves.

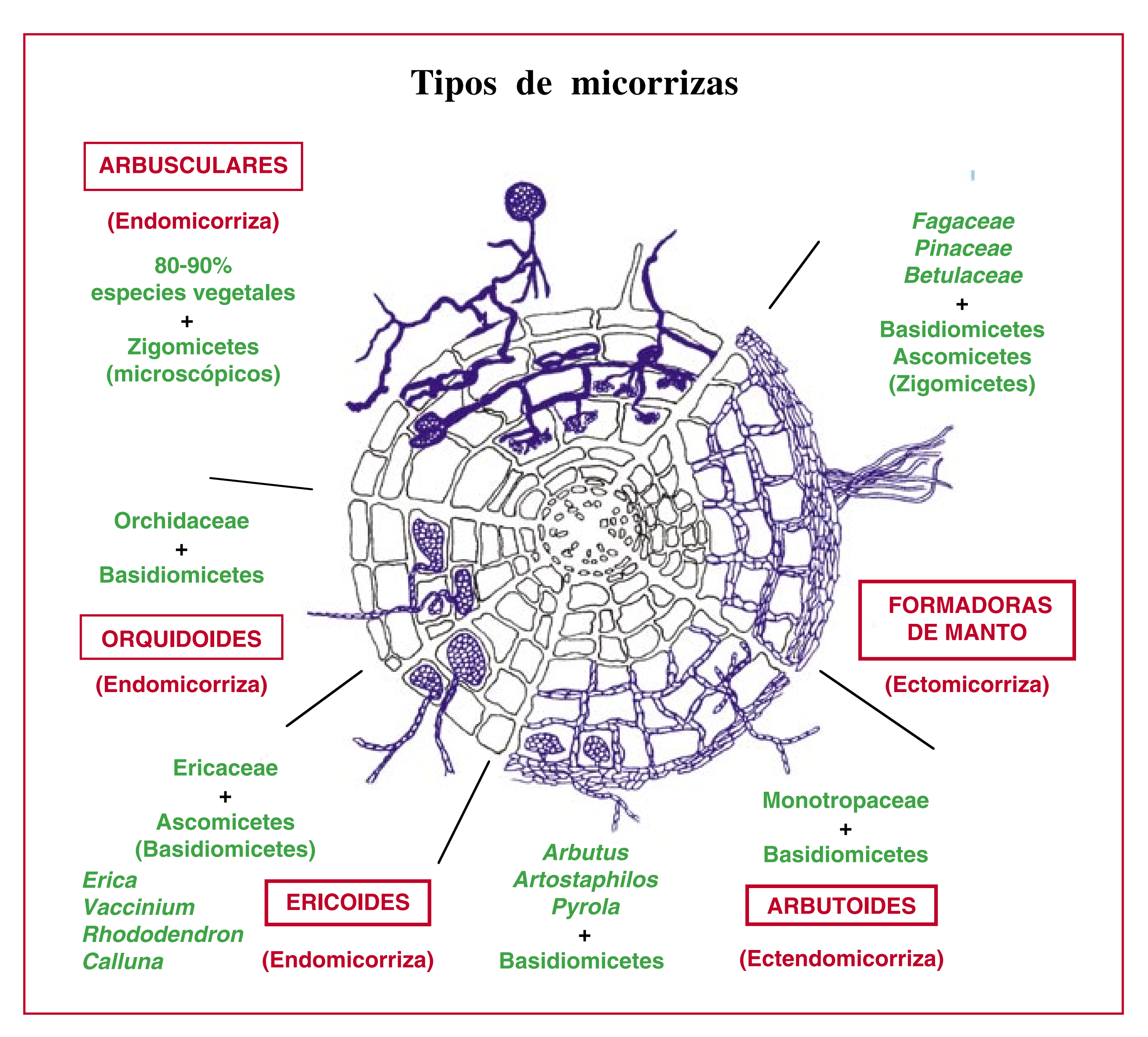
De la diversidad natural de las comunidades microbianas del suelo podría sacarse partido mediante el aislamiento e identificación de nuevas estirpes que sirvieran de inoculantes microbianos en agricultura y en programas de revegetación. En este tema se ha puesto especial énfasis en la fijación simbiótica de N_2 (*Rhizobium*), micorrizas y en el control biológico de enfermedades



6. LA COLONIZACION DE LA RIZOSFERA por microorganismos saprofíticos, patógenos (infección) y simbiontes mutualistas puede llegar a las células corticales de la propia raíz (endorrizosfera). Con los simbiontes mutualistas la planta no sufre daño, sino que obtiene un beneficio. En este conjunto de microfotografías, cedidas por M. Bodmer y H. Schüepp de Wädenswil, se muestran diferentes aproximaciones de la colonización de las células de la corteza de una raíz por un hongo (micorriza). Se distinguen células individuales colonizadas por un "arbúsculo" del hongo.

de las plantas. De *Rhizobium* en particular hay copiosa información genética, bioquímica, fisiológica y ecológica. Algunos problemas se resisten, como el de incrementar la competitividad de las cepas seleccionadas frente a la población naturalizada del suelo.

Por ser simbiontes obligados, los hongos de la micorriza no pueden completar su ciclo de vida salvo en simbiosis con la planta. Por eso, los inóculos disponibles forman una mezcla de estructuras del hongo con el substrato de crecimiento y restos de raíces. Ello hace que estos inóculos, por su peso relativamente elevado, no sean practicables en cultivos arables, aunque sí lo son en cultivos que llevan fase de trasplante como práctica habitual, como acontece en horticultura, fruticultura y en programas de revegetación de suelos. Así, se ha demostrado la efectividad de la inoculación con micorrizas en cultivos de plantas hortícolas (lechuga, cebolla, ajo, espárrago, fresa, pimiento, tomate, leguminosas, etc.); frutales de regiones templadas (cítricos, manzano, ciruelo, cerezo, melocotonero, almendro, olivo, vid, etc.); cultivos tropicales (café, papaya, aguacate, cacao, coco, mandioca, piña, platanera, té, etc.) y ornamentales. Igualmente se han aplicado las micorrizas en plantas de interés en revegetación y recuperación de suelos tales como leguminosas, actinorrizas, aromáticas, melíferas y medicinales (romero, tomillo, lavanda, etc.), sabinas y enebros, *Crataegus* sp., *Prunus* sp., *Pistacia* sp., *Taxus* sp. y otros re-



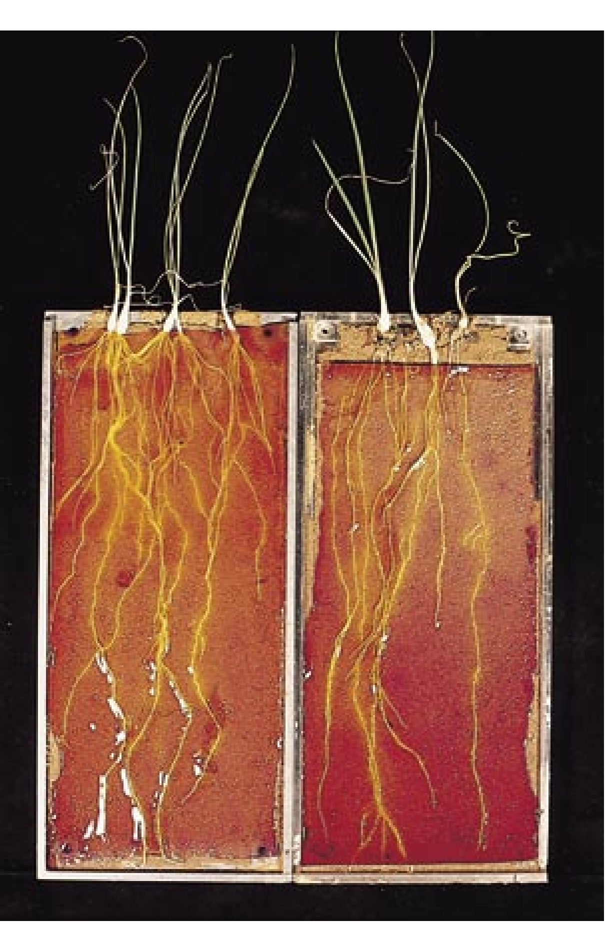
7. LA UNIVERSALIDAD DE LAS MICORRIZAS implica una gran diversidad en lo que concierne a las especies y ecotipos de los hongos y plantas simbiontes. Existen diferencias considerables en la morfología y fisiología de las asociaciones micorrízicas, lo que permite reconocer unos 5 tipos diferentes de micorrizas, tal como ilustra el esquema. Las micorrizas arbusculares, las propias de las plantas de interés agronómico, son las más abundantes en la naturaleza.

presentantes del matorral espinoso mediterráneo.

El control biológico de enfermedades de las plantas se ha practicado mediante la inoculación en la rizosfera de microorganismos antagonistas de los patógenos con el fin de mejorar la sanidad y la productividad de los cultivos. Entre los productos biosintetizados por los microorganismos destacan ciertos sideróforos, ácido cianhídrico y antibióticos. Rizobacterias (*Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp.) y hongos (*Trichoderma* sp., *Gliocadium* sp.) se han ensayado con éxito como agentes de control biológico de hongos del suelo patógenos de las plantas. Las bacterias se aplican a una dosis de unas 10^8 células (unidades formadoras de colonias) por semilla. Los problemas que limitan la efectividad de estos inóculos, tras su introducción en el agroecosistema, son los relacionados con el control de los factores que regulan su competitividad y competencia en la rizosfera para propiciar su establecimiento.

En cuanto a los estudios realizados sobre micorrizas y control biológico en la rizosfera, se ha comprobado que las simbiosis pueden reducir el efecto de patógenos de las raíces. La eficacia, sin embargo, varía con el hongo micorrízico, el patógeno, el substrato y las condiciones ambientales. Parece recomendable utilizar conjuntamente micorrizas y otros agentes de control biológico y desarrollar así sistemas micorrizosféricos apropiados en una acción integrada (ciclado de nutrientes y protección para la planta). En este sentido se están realizando estudios con PGPR (*Pseudomonas, Bacillus, Agrobacterium,* etc.) y en hongos (*Trichoderma*, *Gliocladium*, etc.), habiéndose demostrado que estos agentes de control biológico que antagonizan hongos patógenos no lo hacen, e incluso benefician, a los hongos de la micorriza.

Los microorganismos que se inoculan en el suelo o que se liberan a la rizosfera como inoculantes de las



8. LOS TRATAMIENTOS químicos o biológicos aplicados a una planta producen alteraciones cualitativas y cuantitativas en la exudación radical y en la actividad de los microorganismos rizosféricos. Estas modificaciones se pueden detectar por cambios en el *p*H, lo que se aprecia con el uso de indicadores. Esta fotografía, obtenida por B. Bago y E. George, de Hohenheim, corresponde a un experimento que puede tomarse como ejemplo para explicar cómo se ponen de manifiesto cambios en el *p*H de los exudados de la raíz por inoculación de microorganismos tras la consiguiente colonización de la rizosfera.

semillas tienen que sobrevivir en el medio natural y competir con los microorganismos residentes, así como llevar a cabo su función en condiciones ecológicas naturales. Urge, pues, avanzar en la identificación de los microorganismos de la rizosfera.

Las nuevas técnicas moleculares para identificar géneros y especies se basan en el análisis de moléculas de ADN obtenidas por multiplicación redundante ("amplificación") de secuencias del ADN de los ribosomas del microorganismo, ya que tales moléculas de ADN muestran un alto grado de persistencia en el curso de la evolución. Una vez caracterizado el microorganismo, se le compara con otros pertenecientes a la misma especie para descubrir el ecotipo al que pertenece.

Se puede concluir diciendo que en la rizosfera se expresa un proceso interactivo de flujos causa-efecto altamente interrelacionado y eficaz: los microorganismos de la rizosfera mejoran el crecimiento, nutrición, salud y resistencia al estrés de la planta, mientras que ésta, así fortalecida, es una fuente de energía para el desarrollo de la microbiota alrededor de las raíces. Los componentes de la microbiota, estimulados en la rizosfera, intervienen en la formación de agregados, con la consiguiente mejora de la estructura y calidad del suelo, lo que favorece el desarrollo de las plantas, para cerrar la cadena de interacciones característica de la biología de la rizosfera.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE RHIZOSPHERE. E. A. Curl, B. Truelove, Springer-Verlag, Berlín, 1986.

THE RHIZOSPHERE. J. M. Lynch, J. H. Wiley and Sons, Chichester, 1990.

PLANT GROWTH PROMOTION MEDIATED BY BACTERIAL RHIZOSPHERE COLONIZERS. J. W. Kloepper, R. M. Zablotowick, E. M. Tipping, R. Lifshitz en *The rhizosphere and plant growth*, dirigido por F. Blaine y J. Metting, Marcel Dekker, páginas 315-326, Nueva York, 1991.

MOLECULAR ECOLOGY OF RHIZOSPHERE MICROORGANISMS. F. O'Gara, D. N. Dowling, B. Boesten, VCH, Weinheim, Alemania Federal, 1994.

INTERACTIONS BETWEEN MYCORRHIZAL FUNGI AND RHIZOSPHERE MICROORGANISMS WITHIN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE SOIL-PLANT SYSTEMS. J. M. Barea, C. Azcón-Aguilar, R. Azcón, en *Multitrophic interactions in terrestrial systems*, dirigido por A. C. Gange y V. K. Brown, páginas 65-77, Blackwell Science, Oxford, 1997.

Shawn Carlson

Atrapado en un túnel de viento

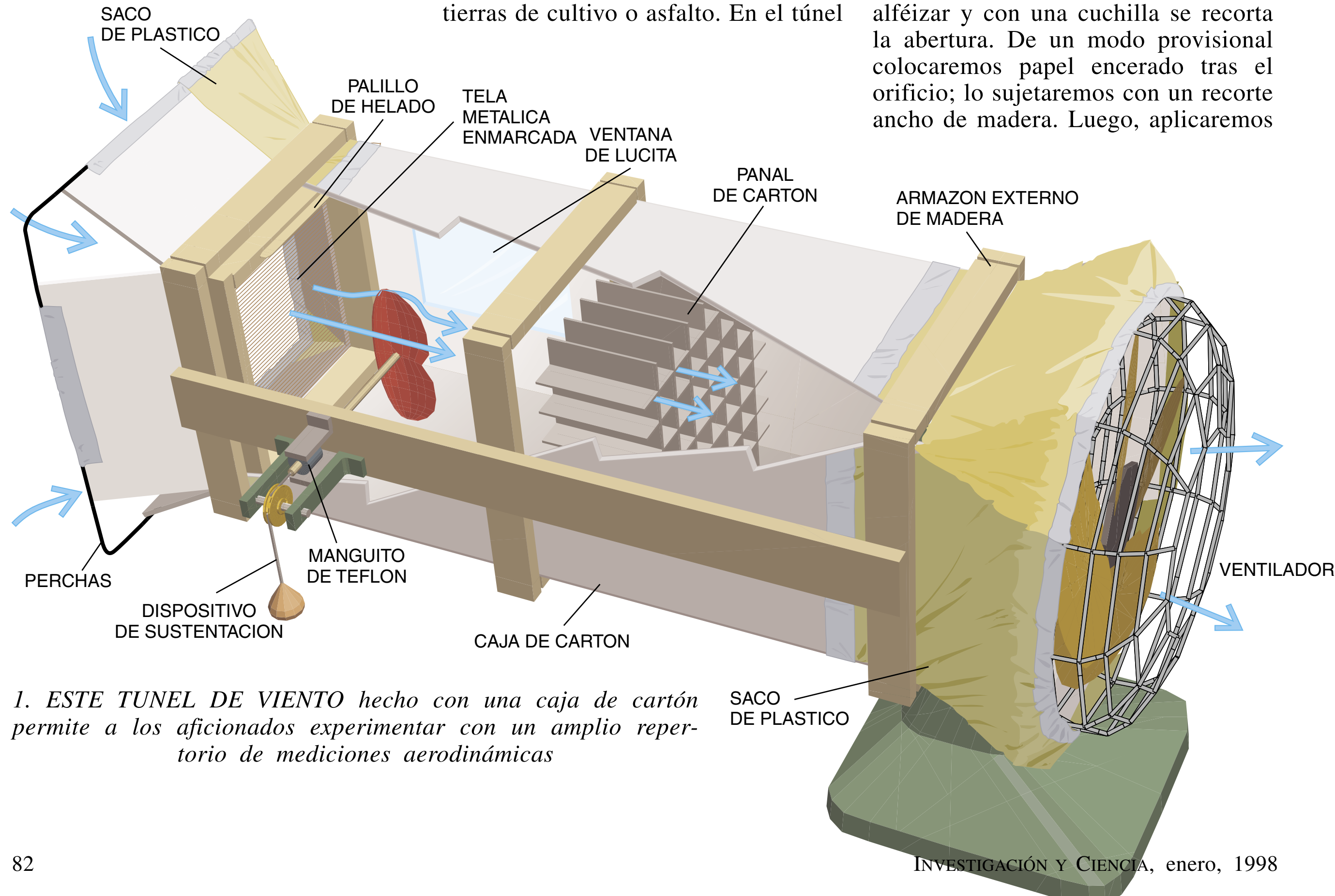
El vuelo controlado se cuenta entre los problemas experimentales más duros de roer de la historia de la técnica. A través de las edades fue abordado por mentes muy ingeniosas. Leonardo da Vinci, por ejemplo, realizó más de 500 dibujos y escribió más de 35.000 palabras sobre el asunto. De las muchas dificultades de difícil sorteo que planteaba el vuelo de los humanos, la estabilidad aerodinámica demostró ser la más ardua de dominar. Un avión puede cabecear o encabritarse, balancearse a derecha e izquierda y guiñar de un costado a otro. Para obtener un vuelo sostenido y horizontal hay que domeñar esos tres movimientos.

El reto fue recogido por Orville y Wilbur Wright, quizá los mejor dotados en el ámbito de la afición a la ciencia que han pisado suelo norteamericano. Aunque la opinión común los cataloga entre los habilidosos, se les rinde más justicia considerándolos científicos de talento. En 1901 dieron comienzo a una de sus aportaciones más importantes, el desarrollo del túnel de viento para convertirlo en un instrumento de investigación preciso. En su seno los hermanos Wright realizaron millares de mediciones sistemáticas, las primeras determinaciones de esta clase auténticamente fiables en el entonces emergente campo de la aeronáutica. Ese esfuerzo recibió su premio dos años más tarde en Kitty Hawk.

Los túneles de viento aún proporcionan a los aficionados incontables oportunidades de investigación en aeronáutica. No sólo en ese campo. El túnel nos permite adaptar los diseños de cometas, aeromodelos, veleros y bólidos con vistas a mejorar sus prestaciones. De hecho, un túnel de viento facilita el estudio de casi todo lo que resulta afectado por el movimiento del aire. Por ejemplo, podemos observar la interacción entre las olas y el viento en la superficie de un líquido. A los ecólogos podría interesarles estudiar la evaporación a través de distintos tipos de suelos o medir el perfil de la velocidad del viento a ras de una batea de hierba, tierras de cultivo o asfalto. En el túnel de viento, puede también investigarse de qué modo se enfrentan los insectos a las brisas intensas, o bien instalar la cámara verticalmente para averiguar la velocidad terminal de las gotas de agua suspendidas sobre una columna de aire. Con un poco de imaginación, las posibilidades de investigación son ilimitadas.

Para ciertos experimentos, creé yo el mío. Es económico y se sirve de un ventilador doméstico para impulsar el aire por la zona de ensayo. El tubo central lo forma una gran caja de cartón. Mide la mía 22 × 22 × 122 cm, pero las medidas exactas carecen de importancia; basta con que se asegure de que la longitud es al menos cuatro veces la anchura. Si el interior se pinta de blanco lustroso, se observarán mejor los experimentos. Para evitar el paso de pequeñas corrientes de aire a través del cartonaje, conviene recubrirlo con una capa doble de esmalte de látex.

Por ventana hay una lámina de lucita. En la ferretería del barrio pueden suministrarnos un paño de 20 × 30 cm. En torno al paño se traza un alféizar y con una cuchilla se recorta la abertura. De un modo provisional colocaremos papel encerado tras el orificio; lo sujetaremos con un recorte ancho de madera. Luego, aplicaremos



1. ESTE TUNEL DE VIENTO hecho con una caja de cartón permite a los aficionados experimentar con un amplio repertorio de mediciones aerodinámicas

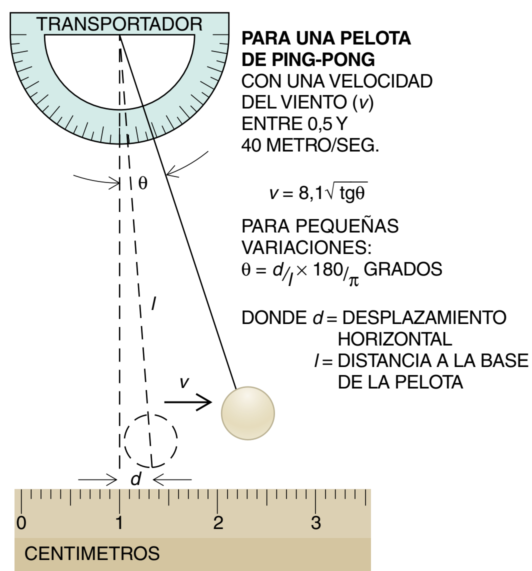
silicona alrededor de la lucita y la adentraremos en el alféizar oprimiéndola para enrasarla con la madera. Haremos hermético el cierre calafateando la juntura con pegamento de silicona.

Para reforzar el tubo, nos valdremos de tablillas de madera para construir tres armazones rectangulares, de ajuste un poco forzado sobre la caja. Se pegan al exterior del túnel. Las tablillas horizontales confieren rigidez a la estructura y prestan soporte a los instrumentos de medida.

Algunos ventiladores impulsan el aire hasta una velocidad de cinco metros por segundo. Si se añade un estrechamiento, aumenta la velocidad del flujo de aire (lo mismo que cegando con el pulgar la boca de una manguera sale más rápida el agua). La razón viene a ser la siguiente: al disminuir en dos tercios el área de la sección transversal en la zona de ensayo se triplica más o menos la velocidad del aire que puede conseguirse. La mayoría de los ventiladores comerciales emplean un conmutador de cuatro posiciones para controlar la velocidad. Para conseguir un ajuste más fino, sustituiremos el conmutador por un atenuador de luz doméstico. Para sujetar las hojas de la tapa de la caja al ventilador emplearemos cinta aislante. Sendos sacos de basura de plástico abiertos por el fondo constituirán unos excelentes manguitos estancos. Deslizaremos uno sobre el ventilador y la caja; lo sujetaremos con cinta.

Para abocinar la entrada al túnel doblaremos hacia afuera las hojas de la tapa del otro extremo, uniéndolas a un cuadrado preparado con dos perchas de alambre. Untaremos de epoxia y extenderemos luego cinta sobre el cuadrado de alambre. Acabada esa parte, colocaremos otro manguito de saco de basura alrededor del extremo opuesto para hermetizarlo asimismo.

La descarga del ventilador crea corrientes de aire en la sala. Algunos de los remolinos formados acabarán arrastrados hacia el túnel. Basta una sola capa de tela metálica en la boca del túnel para eliminar esas odiosas irregularidades. Graparemos la tela metálica en un bastidor de madera que encaje forzadamente en la abertura. Recubriremos de fieltro el borde exterior para que no se infiltre aire del exterior alrededor de los bordes. Como necesitaremos tener acceso al interior, el marco no se someterá a una sujeción permanente. Si encolamos cuatro palillos de helado en las paredes internas justo a la profundidad necesaria respecto a la boca, la tela metálica no se moverá durante los ensayos. Un "panal" (en realidad, un retículo cuadrado de deflectores de cartón) situado inmediatamente junto a la zona de ensayos y corriente abajo facilita el mantenimiento de un flujo suave de aire durante los experimentos.



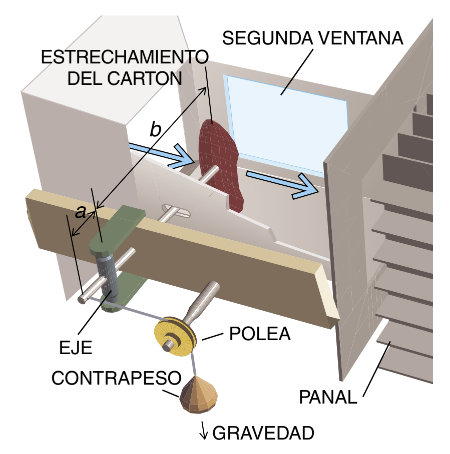
2. UNA PELOTA DE PING-PONG suspendida de una cuerda sirve para medir la velocidad del aire

Tenemos a nuestra disposición un amplio repertorio para medir la velocidad del aire en el interior del túnel: anemómetros de metal caliente [*véase* "Taller y Laboratorio", de enero de 1996, para detalles constructivos], anemómetros de cazoletas de alguna vieja estación meteorológica, manómetros o anemómetros ultrasónicos. E incluso, ¿por qué no acoplar una pelota de ping-pong, un transportador y un trozo de hilo blanco y crear nuestro propio medidor? El ángulo que alcance el hilo (*véase figura 2*) dependerá de las intensidades relativas de las fuerzas de la gravedad y la resistencia aerodinámica de la bola. Nos serviremos de la fórmula que se da en la ilustración. El valor que obtenga será correcto dentro de un diez por ciento, pero a causa de ciertas sutilezas de la dinámica de fluidos es válido sólo entre 0,5 y 40 metros por segundo.

A los apasionados de la aeronáutica les gustaría medir las fuerzas aerodinámicas. La determinación de todas las fuerzas y pares de fuerzas posibles requiere seis mediciones simultáneas. Pero a los experimentadores a menudo les interesa sólo una magnitud (la sustentación en un ala o la resistencia aerodinámica, por ejemplo). Si montamos el modelo de costado, la gravedad queda fuera de la ecuación.

Para medir la sustentación, aumentaremos el contrapeso hasta que el modelo no se mueva al soltarlo. Entonces, el contrapeso será igual a la fuerza aerodinámica sobre el modelo. Para la resistencia aerodinámica, el contrapeso aplica un par de fuerzas que contrarresta al que aplica la fuerza de resistencia aerodinámica. Esta entonces será igual al cociente de los brazos del momento (a/b) multiplicado por el contrapeso. Si nos falta un juego de pesas calibradas, o somos más exquisitos en nuestras exigencias, acudiremos a las referencias listadas en el dominio World Wide Wed de la Society for Amateur Scientists, que describen procedimientos de equilibrado más depurados. Como último incentivo, por qué no imaginar cómo registrar las fuerzas electrónicamente.

Para información acerca de este proyecto u otras actividades para científicos aficionados, escríbase a la Society for Amateur Scientists, 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117. Asimismo puede el aficionado visitar el dominio World Wide Web de la sociedad en www-thesphere.com/SAS/, llamar al 619-239.88.07 o dejar un mensaje en el 800-873.87.67.



3. EL DISPOSITIVO de resistencia aerodinámica emplea un eje con un contrapeso para medir la fuerza aerodinámica

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

Los dados: tentadores e instructivos

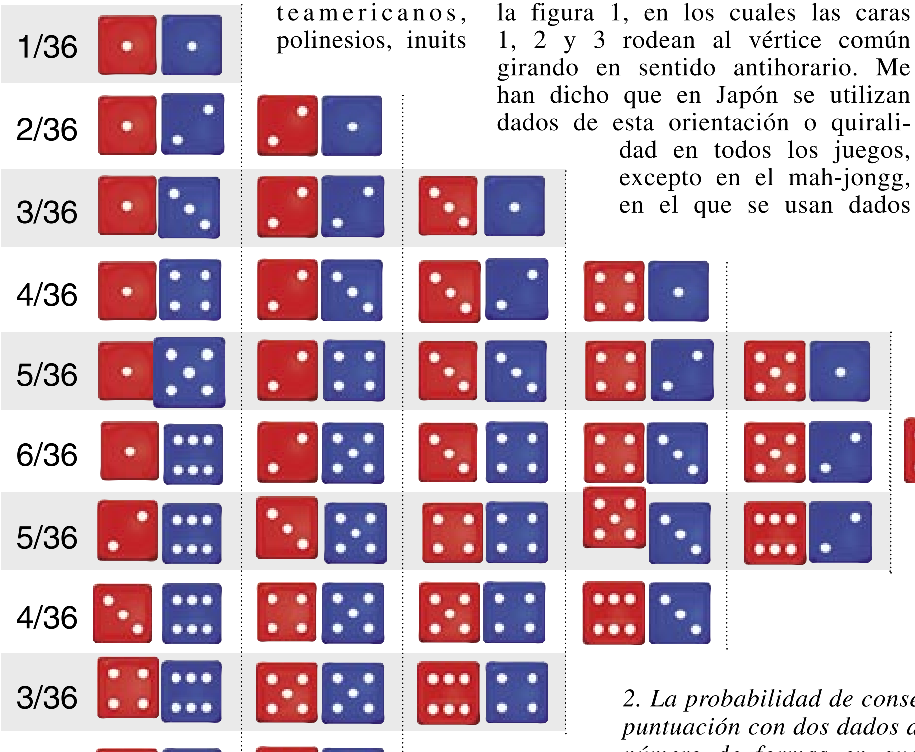


1. Los dados normales son como los dados blancos: las caras marcadas con 1, 2 y 3 puntos giran en sentido antihorario alrededor de un vértice común. En los dados negros, las caras están dispuestas en sentido antihorario

Los dados se cuentan entre los artilugios más antiguos utilizados en juegos de apuestas. Heródoto afirma que fueron inventados por los lidios en tiempos del rey Atys, pero Sófocles le rebate, y atribuye la idea a un griego llamado Palamedes, quien, al parecer, los inventó durante la guerra de Troya. Por plausible que parezca que la invención de los dados se debiera a los aburridos sitiadores para matar el tiempo, la verdad es que los arqueólogos han descubierto dados cúbicos, idénticos a los actuales a todos los efectos, en tumbas egipcias del año 2000 a.C. Y también se han encontrado dados en yacimientos chinos que se remontan al 600 a.C.

Mayas, aztecas, indios norteamericanos, polinesios, inuits y no pocas tribus africanas se han servido de dados de las formas más diversas y con las marcas más extrañas, construidos con materiales que van desde los dientes de castor hasta la porcelana. En este artículo voy a fijarme exclusivamente en los dados modernos normales. Son, desde luego, de forma cúbica, y llevan grabados una serie de puntos en cada cara. El número de puntos es 1, 2, 3, 4, 5 y 6. El total de puntos de cada par de caras opuestas siempre es 7, por lo que las caras están agrupadas en tres pares: 1 y 6, 2 y 5, 3 y 4. Hay exactamente dos disposiciones con esta propiedad, cada una de ellas, imagen de la otra en un espejo. En la actualidad, prácticamente todos los dados de fabricación occidental son similares a los dados blancos de la figura 1, en los cuales las caras 1, 2 y 3 rodean al vértice común girando en sentido antihorario. Me han dicho que en Japón se utilizan dados de esta orientación o quiralidad en todos los juegos, excepto en el mah-jongg, en el que se usan dados que son imagen en un espejo de los anteriores, como los dados negros de la figura. A partir de aquí me referiré a los dados occidentales, salvo aviso en contrario.

Es corriente lanzar los dados por pares con la intención de lograr un total fijado de antemano. Supondremos, para empezar, que los dados son "imparciales", con lo que cada cara tiene probabilidad $^1/_6$ de aparecer en lo alto. Para calcular la probabilidad de una determinada puntuación total, hemos de calcular de cuántas formas podemos conseguirla. Después dividiremos ese número por 36, que es el total de pares de resultados, considerados los dados distinguibles.



2. La probabilidad de conseguir cierta puntuación con dos dados depende del número de formas en que se pueda lograr cada total. Cada fracción (a la izquierda) *representa la probabilidad de conseguir el total obtenido, sumando, por pares, las caras de los dados rojo y azul que están a la derecha.*

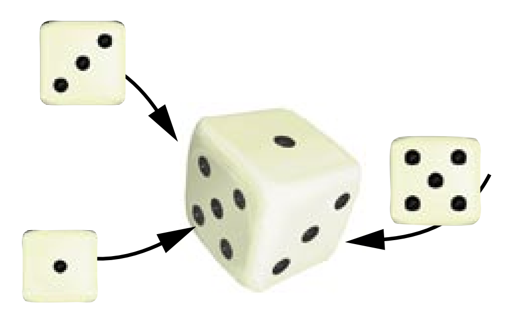
A tal fin, resulta conveniente imaginar que uno de los dados es rojo, y el otro, azul. En tal caso, sólo hay una manera de lograr un total de 12 puntos: dado rojo = 6, dado azul = 6. La probabilidad de sumar 12 puntos, por tanto, es $^1/_{36}$. El total de 11, por otra parte, puede conseguirse de dos modos: con dado rojo = 6 y dado azul = 5, o con dado rojo = 5 y dado azul = 6. La probabilidad de su-

mar 11 es, por consiguiente, $^{2}/_{36}$, o sea, $^{1}/_{18}$.

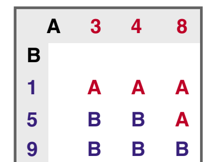
El gran matemático y filósofo Gottfried Leibniz opinaba que las sumas 11 y 12 deberían tener la misma probabilidad, porque, pensaba, sólo había una forma de conseguir un 11: con un 6 en un dado y un 5 en el otro. Esta teoría plantea varias dificultades. La más importante es, seguramente, que contraviene al experimento, en el que 11 se presenta con frecuencia doble que el 12. Otra es que conduce a la inverosímil conclusión de que la probabilidad de que dos dados presenten un cierto total, cualquiera que éste sea, es menor que 1. La figura 2 indica las probabilidades correspondientes a todos los totales, desde 2 hasta 12.

Un juego en el que resulta crucial una percepción intuitiva de las probabilidades es el llamado "craps", ideado hacia 1840. Uno de los jugadores, el lanzador, apuesta una cantidad de dinero. Los demás la "atenúan", es decir, apuestan un total, no mayor, que ellos deciden. Si el total "atenuado" es menor que la apuesta inicial del lanzador, éste ha de reducir su apuesta e igualarla al total. El jugador lanza los dados. Si en el primer envite consigue un total de 7 o de 11 puntos (un "natural"), gana directamente; si su tanteo es de 2, 3 o 12 puntos ("craps"), pierde directamente. En los demás casos —4, 5, 6, 8, 9 o 10— la primera puntuación del lanzador es su "punto". Continúa lanzando, tratando de lograr su punto antes de que salga un 7. Si lo consigue, gana todo el dinero; si fracasa, lo pierde todo.

Habida cuenta de las probabilidades y de las reglas del juego, se puede calcular que la probabilidad de ganar es $^{244}/_{495}$, o sea, aproximadamente un 49,3 por ciento. Es sólo un poco menos que al jugar a "cara o cruz" (50 por ciento.) Los jugadores profesionales pueden trocar en ventaja a su favor esta ligera desventaja por dos procedimientos. Uno consiste en aceptar o en rechazar diversas "apuestas secundarias" con otros jugadores. El otro es hacer trampas, introduciendo en el juego, con habilidad, dados trucados.

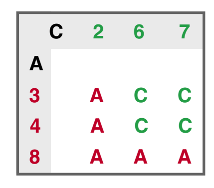


3. "Tapas". Dados falsos que tienen, por ejemplo, en sus caras sólo las puntuaciones 1, 3 o 5, por lo que nunca pueden ser "expulsados" en una partida de "craps"



A	3	4	8
B			
1	A	A	A
5	B	B	A
9	B	B	B

B	1	5	9
C			
2	C	B	B
6	C	C	B
7	C	C	B



C	2	6	7
A			
3	A	C	C
4	A	C	C
8	A	A	A

4. Los dados intransitivos, rotulados A, B y C, tienen la peculiar propiedad de que, por término medio, B supera a A y C supera a B, pero A supera a C. El dado A tiene en sus caras solamente las puntuaciones 3, 4 y 8; B tiene solamente las 1, 5 y 9; mientras que C tiene solamente las 2, 6 y 7. El cuadro expone los resultados posibles cuando cualquiera de estos curiosos dados compite con otro

Hay toda una variedad de formas para trucar los dados. Por ejemplo, se pueden afeitar cuidadosamente ciertas caras para que sus ángulos no sean rectos, o se los puede "cargar", lastrándolos con pesos. Ambas técnicas dan por resultado el que ciertos lanzamientos sean más probables que otros. Un método drástico consiste en reemplazar los dados por otros especiales, llamados "tapas" y "fondos", que sólo contienen tres puntuaciones distintas, pues sus caras opuestas llevan puntuaciones iguales. La ilustración al pie presenta un dado que sólo tiene las caras 1, 3 y 5. Considerando que los jugadores sólo pueden ver tres caras del dado de una vez, y puesto que no hay caras contiguas marcadas con iguales puntuaciones, a primera vista todo parece estar bien. No es posible, empero, garantizar que en todos los vértices la secuencia cíclica de las puntuaciones corresponda al orden correcto. De hecho, si en un vértice la secuencia es 1-3-5 en sentido antihorario, tendrá que ser 1-3-5 en sentido horario en un vértice adyacente.

En el juego de "craps", los tapas y fondos sirven para diversos fines. Por ejemplo, con un par de dados 1-3-5 nunca se puede sumar 7, por lo que un jugador que los utilice nunca hará "craps". La combinación de un dado 1-3-5 y de otro 2-4-6 no puede producir jamás sumas pares, así que con estos dados el jugador no puede lanzar 4, 6, 8 o 10. Los "tapas" tienen que usarse con parquedad, porque hasta el más ingenuo de los jugadores empezará a preguntarse por qué las puntuaciones siempre suman números pares.

Son muchos los trucos de ilusionismo basados en los dados. No pocos se fundan en la regla de que las caras opuestas han de sumar 7. Uno de estos juegos es descrito por Martin Gardner en su libro *Festival mágico-matemático*. El mago se vuelve de espaldas y le pide a una persona del público que lance tres dados y le diga la suma de sus caras. Después, le pide a la víctima que tome uno cualquiera de los dados y le sume al total anterior la puntuación de la cara inferior. Por último, vuelve a lanzar el mismo dado y suma el número que salga al total anterior. (El voluntario guarda para sí todos estos totales.) Ahora el mago se vuelve e inmediatamente declara cuál ha sido el resultado, a pesar de no saber qué dado fue el elegido.

¿Cómo funciona el truco? Supongamos que las caras superiores de los dados lleven los números a, b y c y que se haya elegido el dado a. El total inicial es $a+b+c$. A este número se le suma $7-a$, lo que da $b+c+7$. Entonces se vuelve a lanzar a, lo que da d, y el resultado final es $d+b+c+7$. En ese momento, el mago mira los tres dados, cuyo total es $d+b+c$, y lo único que tiene que hacer es sumarlos rápidamente y añadir 7.

Henry Ernest Dudeney, el célebre problemista inglés, expone un truco distinto en su libro *Amusements in Mathematics*. Lo mismo que antes, el mago pide que se lancen tres dados mientras permanece vuelto de espaldas. Esta vez la víctima ha de duplicar el valor del primer dado y sumarle 5; multiplicar el resultado por 5 y sumar la puntuación del segundo dado; después ha de multiplicar este resultado por 10, y por fin, sumar la puntuación del tercer dado. Al serle dicho el resultado final, el mago revela las puntuaciones de cada uno de los tres dados. Y es que ahora el resultado final es, evidentemente, $10(5(2a+5)+b)+c$, o sea, $100a+10b+c+250$. El mago le resta 250 al resultado, y los tres dígitos del número resultante corresponden a las puntuaciones de los dados.

En otros problemas con dados se utilizan dados modificados, con numeración no estándar. Por ejemplo, ¿se le ocurre a usted alguna forma de rotular dos dados, valiéndose tan sólo de los números 0, 1, 2, 3, 4, 5 o 6 para obtener un par de dados tales que todos los totales, desde 1 hasta 12, sean igualmente probables? (Véase la solución al final del artículo.) Tal vez el fenómeno más contrario a la intuición sea el de los "dados intransitivos." Construya tres dados, A, B y C rotulados como sigue:

A: 3 3 4 4 8 8
B: 1 1 5 5 9 9
C: 2 2 6 6 7 7

A la larga, B vence a A. De hecho, la probabilidad de obtener con el dado B un número más alto que con A es $5/9$. Análogamente, C vence a B con probabilidad $5/9$. Así pues, es obvio que C vence a A, ¿no es cierto? Pues no: A vence a C con probabilidad $5/9$. La figura 4 justifica estas afirmaciones. ¡Se puede ganar una fortuna con estos dados! Deje que su adversario elija el que prefiera; usted opta entonces por uno que le supere (con probabilidad mayor que el 50 por ciento, a la larga). Repita. Usted ganará en el 55,55 por ciento de las jugadas. Y sin embargo, su adversario tiene la libre opción de elegir el dado "mejor".

Una palabra de advertencia, no obstante: no deposite demasiada fe en las leyes de la probabilidad sin antes fijar con mucha precisión las reglas del juego. En su maravilloso librito *The Broken Dice* (Los dados rotos), Ivar Ekeland cuenta la historia de dos reyes nórdicos que se jugaron a los dados la suerte de una isla en disputa. El rey sueco lanzó los dados y puntuó un doble 6. Tal resultado, se jactó, es insuperable, y el rey Olaf de Noruega podía ir dando la partida por perdida. Olaf murmuró algo así como que también él podría conseguir un seis doble, y lanzó los dos dados. Uno salió 6; el otro se rompió en dos pedazos, uno de los cuales mostraba un 1 y el otro un 6. Total: ¡13! Lo cual viene a demostrarnos que lo que uno considera posible depende de la forma en que se modelice el problema.

Lo que son las cosas: no faltan cínicos que piensen que el buen Olaf tenía preparado todo el montaje.

SOLUCION: Para que los totales de 1 a 12 sean todos equiprobables, un dado ha de llevar las caras marcadas 1, 2, 3, 4, 5 y 6 y el otro, 0, 0, 0, 6, 6 y 6.

Acuse de recibo

El correo sobre Juniper Green (mayo) fue tan voluminoso, que *Acuse de recibo* hará todavía menor justicia que de costumbre. Ante todo, mis disculpas por diversos errores. La peor fue mi alusión a "Richard Porteous" como inventor del juego: no se llama Richard, sino Rob. Un lector de Colorado señaló que el paso 18 del primer cuadro no tiene en cuenta que Benito puede elegir 18 en lugar de 2. Muchos lectores me corrigieron sobre el estado de JG-1, que es secundario, porque Alicia no puede jugar 1 en la apertura y, por consiguiente, no puede jugar en absoluto. También JG-9 es secundario.

Porteous me envió un análisis de JG-100 realizado por tres de sus actuales alumnos, quienes demuestran, en particular, la existencia de estrategias ganadoras si se empieza con 58 o 62. Un lector de Florida llega también a la misma conclusión. Señala que los números primos desempeñan un rol en todos los aspectos del juego y los clasifica en cuatro categorías: grandes (53, 59, 61, 67, 71, 73, 79, 83, 89, 97), medianamente grandes (37, 41, 43, 47), medianos (29, 31) y pequeños (17, 19). Las aperturas de victoria son el doble de los números primos medianos.

Un lector de California recordó que el juego fue analizado en un curso de teoría de números impartido en la Universidad de Princeton por Eugene P. Wigner en los años treinta. En él se proporcionó un criterio para ganar en todos los casos. La respuesta para JG-n depende de la paridad o imparidad de las potencias de los números primos que aparecen al descomponer en factores primos $n!$ (léase "factorial de n: $n! = n(n-1)(n-2) \ldots 1$).

—I. S.



Sobre el vil metal contante y sonante

Hace poco, estaba haciendo la cuenta de los dólares que me tocaba pagar a escote del importe de un almuerzo, cuando me vino a la memoria que había sido un erudito holandés del siglo XVI quien dio curso al dinero decimal. Se llamaba Simon Stevin. Un héroe cabal, aunque desconocido por la mayoría. Su lema pudo habérselo apropiado cualquiera de los grandes de la revolución científica que acabarían por eclipsarlo: "siempre hay una explicación racional para lo que parece fruto de magia".

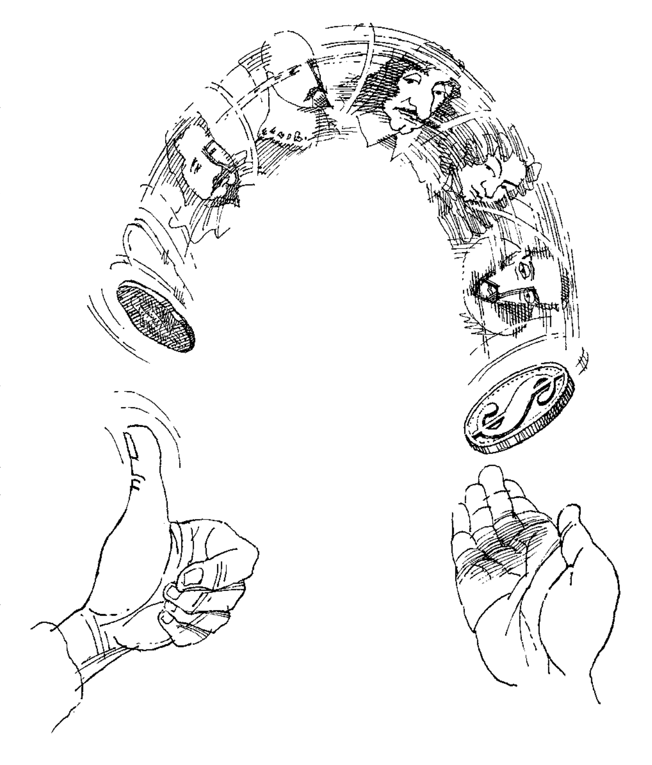
Stevin popularizó una opción alternativa a la retorcida práctica medieval de calcularlo todo en fracciones. (Para paladear la tortura aludida, pruébese a resolver $^3/_{144} \times {}^2/_{322} - {}^1/_{85} = ?$) Transformó ese galimatías en decimales, con los que los científicos y muchos otros como yo podemos operar de manera más sencilla. Incluso escogió para el tratado que escribió sobre el tema un título amable para el usuario: *El Décimo*.

En 1585 Stevin fue nombrado intendente y comisario de obras públicas por el príncipe Maurice de Nassau, gobernador entonces de Holanda septentrional. Maurice era un apasionado de la historia militar que creía que había mucho que aprender de la disciplina con que los romanos se aplicaron a la guerra. Preparó así un ejército que se quedaría, podríamos decir, compuesto y sin novia. Cualquiera de las innovaciones que introdujo (uso de cartuchos, instrucción militar y un manual que enseñaba el manejo de los mosquetones) podría haberle dado la victoria en una gran batalla, si se le hubiera presentado la ocasión. Pero nunca tuvo que hacer frente a algo más que escaramuzas. Esto allanó el camino hacia la gloria a su contemporáneo, el rey escandinavo Gustavo Adolfo, quien, algunos años más tarde, abriría a sus soldados nuevos caminos a la victoria. Una de sus mejoras clave consistió en disponer a sus mosqueteros en tres filas, de tal forma que mientras los del primer escalón disparaban, los siguientes cargaban el arma y quedaban listos para adelantarse y abrir fuego. Se conseguía así una descarga constante contra las posiciones enemigas. Gracias a esa táctica, Gustavo ganó todas las batallas en las que participó (excepto la última, en que resultó muerto) e hizo de Suecia una potencia mundial.

Le sucedió su hija el rey Cristina (no es un error tipográfico; sólo la consorte del monarca recibía el título de *reina*), que se cortó el pelo, se enfundó ropa de hombre, se convirtió al catolicismo y abdicó en 1654, tras apenas diez años en el trono. Se mudó a Italia donde algunos le atribuyen, sin mayores pruebas, una relación duradera con cierto purpurado calavera. Aunque los suecos protestantes disientan del paso dado por su monarca, muchos vemos la influencia de Cristina en la creación del primer teatro de la ópera de Roma y en la afortunada carrera de Bernini, Carlatti y Corelli (a quienes protegió de las diversas formas de traición al uso en Roma). Menos admiración despierta lo que le hizo a René Descartes. Cuando aún era rey (perdón, reina) invitó al eminente filósofo francés a su corte; una vez allí le rogó le diera clases de filosofía a las cinco de la mañana. En Estocolmo. En enero. A nadie extrañará que contrajera una neumonía que le llevó a la tumba.

Por fortuna, cuando esto ocurrió, a Descartes ya le había dado tiempo de publicar su *Discurso del Método*. En él nos enseñó a pensar de forma recta a la vez que ofreció una visión radicalmente nueva del cosmos y una descripción de cómo el cuerpo humano funcionaba a la manera de una máquina. Se explicaba que el cerebro gobernaba un sistema de tubos y válvulas y controlaba la distribución del *espíritu animal*, la sustancia líquida que producía el movimiento de las diferentes partes de la anatomía. Igual que su obra movió a un tal Tom Willis, un esforzado médico de la Universidad de Oxford, a dedicar varios años a preparar una obra sobre el asunto que llevaría el título de *La Anatomía del cerebro*. Contenía la primera referencia a las responsabilidades autónomas del cerebelo y fue una obra definitiva durante 150 años. El libro de Willis constituyó un éxito de ventas internacional porque fue el primero en reproducir numerosas ilustraciones, tan detalladas y exactas que hasta *Lancet* las hubiera publicado en exclusiva.

Las realizó el mejor dibujante, arquitecto, lingüista, matemático, meteorólogo, astrónomo y cabeza amueblada de Inglaterra, sobre todo si consideramos que hay que tener mucha baraca para lanzarte a solicitar con 36 años el contrato para la reconstrucción de la catedral de San Pablo después del Gran Incendio de Londres y en-



cima que te lo concedan. Christopher Wren era también un hábil hombre de negocios (dudo que sorprenda ya a nadie), de los primeros en meterse en el juego de las acciones y participaciones empresariales. Se le nombró director de una empresa con licencia para imprimir dinero, la Hudson's Bay Company. Considerando los beneficios que la compañía repartió (y aún reparte) entre sus inversores, es una lástima que el descubridor que dio nombre a la bahía obtuviera tan escasa recompensa. Como muchos navegantes europeos, Henry Hudson dedicó una buena parte de su vida a navegar sin rumbo fijo. En particular, en 1609, la Compañía Holandesa de la Indias Orientales le encargó encontrar el Paso por el Artico Noroccidental más allá de Groenlandia y América. Se pretendía que las especias, la porcelana y el té del lejano Oriente llegaran hasta Holanda fuera del alcance de españoles y portugueses, que controlaban las rutas del sur. Después de navegar durante meses de un lado a otro por las costas de Islandia esquivando témpanos, Henry volvió a Amberes para cambiar algunas palabras con el supuesto cartógrafo que le había metido en semejante berenjenal.

El infeliz, un pastor protestante reconvertido en cartógrafo, Pieter Platvoet, que había aprendido cuanto sabía (Hudson: "¡No lo bastante!) del auténtico gran cartógrafo Gerardus Mercator, cuya fama corrió como la pólvora. El responsable fue Christophe Plantin, el editor más rico de Europa, que también fabricaba con éxito ropa interior en Francia.

Plantin amasó una fortuna gracias a la unificación de la liturgia impuesta por el Concilio de Trento. El impresor holandés le colocó a Felipe II cuarenta mil misales. Para ser exactos, la hubiera amasado de haber pagado el monarca español sus deudas a tiempo. El problema financiero de Felipe II fue su padre, que había llegado a Emperador del Sacro Romano Imperio untando a las personas apropiadas con dinero que le había prestado (y a quien Felipe II debería luego devolver) un banquero alemán llamado Anton Fugger, el Rothschild de la época. La familia Fugger llevaba en el negocio del dinero más de cien años y prácticamente todas las cabezas coronadas de Europa tenían deudas con ellos. Los monarcas utilizaban ejércitos de mercenarios y nunca disponían de efectivo para pagarles, así que los Fugger les socorrían a cambio de propiedades, exenciones fiscales o concesiones monopolistas.

Uno de estos lotes de agradecimiento incluía una franquicia minera en las montañas de Bohemia: un agujero en el suelo del que salía tanta plata que se convirtió en la fuente de moneda de todo el Sacro Romano Imperio. La mina estaba en el valle Joachimsthal, por lo que las monedas se conocían como "Joachimstalers". Con el paso del tiempo el nombre se acortó: "Talers" (táleros). Y al pasar aún más tiempo, la pronunciación norteamericana de la palabra se convirtió en el nombre de la moneda que quería dejar de propina al final de la comida del principio de este articulillo.

Síndrome de Down

Entre el afecto y la estimulación

SÍNDROME DE DOWN: BIOLOGÍA, DESARROLLO Y EDUCACIÓN. NUEVAS PERSPECTIVAS por Jesús Flórez *et al.* Masson; Barcelona, 1997.

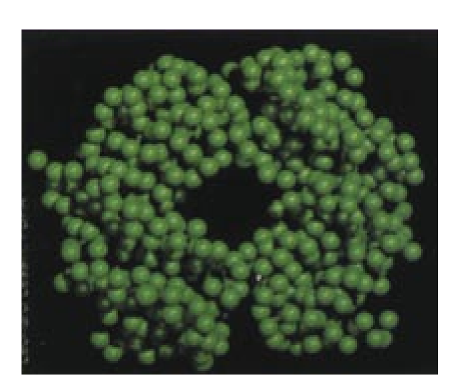
El libro ofrece al lector las propuestas, resultados y conclusiones de una conferencia sobre el síndrome de Down que, bajo los auspicios de la Fundación Síndrome de Down de Cantabria y la Fundación Marcelino Botín, tuvo lugar en Santander, en 1996.

Los compiladores exponen, en un capítulo introductorio, los tres objetivos fundamentales de la biología del síndrome de Down: definir el genoma propio del cromosoma 21, establecer la relación causal entre genotipo y fenotipo, y desentrañar las bases neurobiológicas responsables del desarrollo de la deficiencia mental.

Me han sorprendido en el libro algunas cosas. Por ejemplo, que Flórez, Troncoso y Diersen se sientan todavía en la obligación de señalar que "ya no es una necedad ni una hipótesis aventurada afirmar que no sólo las funciones físicas sino también las mentales pueden ser mejoradas cuando son sometidas a procesos de intervención... Si cabe mejorar la capacidad y la función muscular, ¿qué impide que pueda también prosperar la función intelectual?". Hace veinte años, en estas mismas páginas ya mostrábamos no tanto hipótesis tentativas sino primeras realidades y datos de que esto podía ser así.

No menos sorprendente para una persona que tomó parte activa en el establecimiento de los primeros laboratorios y programas de estimulación precoz para niños con síndrome de Down que se desarrollaron en Barcelona en los años setenta —siguiendo, en gran parte, el modelo que Bijou y Dimitriev habían establecido en la Universidad de Washington; que Ribes había aplicado en México; que Penzo, adaptando a nuestra realidad la línea de Sapon en la Universidad de Rochester, había establecido en Palma de Mallorca; y que Giné y colaboradores practicaban en la Escuela "Sants Innocents" de Barcelona— es la afirmación de Flórez *et al.* de que "son escasos los trabajos publicados en la literatura mundial especializada, que demuestren con datos objetivos el tipo y grado de beneficios que la intervención temprana reporta a los niños con SD". ¿Es que la línea de investigación, puesta en marcha en la Universidad de Washington, ha desaparecido sin dejar apenas rastro?

Encuentro a faltar una puesta al día del tema del síndrome de Down desde un punto de vista psicosocial ya que el capítulo introductorio "Investigación española sobre el síndrome de Down: visión panorámica" es más una presentación de los trabajos contenidos en el libro que una visión global de la situación actual de la investigación en España. Los diversos capítulos que forman el libro se me aparecen, por tanto, como las piezas de un puzzle —piezas sin duda valiosas— de las que es imposible saber dónde encajan ni cuántas faltan, ya que el libro facilita ciertamente algunas pistas pero ningún modelo de referencia.



Estructura del α-interferón

Cunningham, en la ponencia que presentó en las V Jornadas Internacionales sobre el Síndrome de Down, nos proporciona claves para contestar a algunos de los interrogantes. Se pone allí de relieve los peligros que podrían derivarse de la tendencia vigente en los años setenta de una implicación excesiva de los padres en los aprendizajes motrices y cognitivos tempranos de sus hijos, y muy especialmente, de la posible introducción de una dimensión patológica en las relaciones familiares y en el papel del niño. El énfasis debería situarse no tanto en una estimulación precoz del niño como en obtener para él un ambiente emocional de aceptación.

RAMÓN BAYÉS

Matemática

De rudimentos a ideales

L'EUROPE MATHÉMATIQUE. Dirigido por Catherine Goldstein, Jeremy Gray y Jim Ritter. Editions de la Maison des sciences de l'homme; París, 1996. **CONTRA LOS TITANES DE LA RUTINA**. Dirigido por Santiago Garma, Dominique Flament y Víctor Navarro. CSIC; Madrid, 1994.

MATHEMATIK UND ASTRONOMIE AN DER UNIVERSITÄT INGOLDSTADT IM 15. UND 16. JAHRHUNDERT, por Christoph Schöner. Duncker und Humblot; Berlín, 1994. **METAPHYSIK UND MATHEMATIK BEI GIORDANO BRUNO**, por Angelika Bönker-Vallon. Akademie Verlag; Berlín, 1995.

SYMBOLS, IMPOSSIBLE NUMBERS, AND GEOMETRIC ENTANGLEMENTS, por Helena M. Pycior. Cambridge University Press; Cambridge, 1997. **BERNARD BOLZANO. MISCELLANEA MATHEMATICA**. Edición preparada por Bob van Rootsellar y Anna van der Lugt. Friedrich Frommann Verlag; Stuttgart, 1995.

MODERN ALGEBRA AND THE RISE OF MATHEMATICAL STRUCTURES, por Leo Corry. Birkhäuser Verlag; Basilea, 1996. **GEORGE G. LORENTZ. MATHEMATICS FROM LENINGRAD TO AUSTIN**. Compilación preparada por Rudolf A. Lorentz. Birkhäuser Verlag; Basilea, 1997.

Hace unos 3500 años, Ahmes, escriba egipcio, anotaba en papiro una forma sagaz de expresar las fracciones, a través de sumas de recíprocos de enteros, con el me-

ARITHMETICA
DEMONSTRADA
THEORICO-PRACTICA
PARA
LO MATHEMATICO
Y MERCANTIL.
EXPLICANSE
LAS MONEDAS, PESOS, Y MEDIDAS DE LOS Hebreos, Griegos, y Romanos; y de eſtos Reynos de Eſpaña, conferidas entre sì:
COMPUESTA
POR JUAN BAUTISTA CORACHAN, *Maeſtro en Filoſofia, Dr. en Sagrada Theologia, y Cathedratico de Mathematicas en la Univerſidad de Valencia ſu Patria.*
José M. Valderas
ADVIERTASE, QUE PARA NO TRASTOCAR LAS Operaciones, la moneda de oro, y plata Caſtellana queda en el miſmo valor que tenia en el año 1699. que fue quando ſaliò à luz la primera impreſſion deſta Obra, ſupueſto no es circunſtancia que varie el modo de obrar.
Con licencia, Barcelona: Por JUAN PIFERRER Impreſſor, Plaza del Angel. Año 1719.

"Analytica, es una parte de la Arithmetica practica, que trata de la resolucion de las potestades en sus raìces; ò de la extraccion de las raìces de las mismas potestades, que todo es uno, y contiene dos partes; la primera trata de la extraccion de dichas raìces; y la segunda de la invencion de diferentes medios proporcionales." (Lib. III, introducción, de la Arithmetica *de Juan Bta. Corachán.)*

nor número de cifras posible y sin repeticiones. Para escribir el valor del quebrado "$^{2}/_{17}$" su cálamo iba desgranando $^{1}/_{12} + ^{1}/_{51} + ^{1}/_{68}$. Por retorcido que parezca, este método daba resultados exactos con una economía de notación sorprendente.

De los griegos, que trajeron a Europa el saber egipcio, hemos heredado el arte de formalizar la argumentación mediante reglas que aseguran la verdad de la conclusión a partir de premisas ciertas. Los helenos idearon sistemas lógicos de deducción, la silogística aristotélica, y geométricos, el canon euclídeo. Con ese andamiaje ha amasado Occidente su progreso. Podemos comprobarlo en sendos sumarios generales, de autoría en algún caso compartida (Rashed y Ortíz) y temas convergentes. Pugna el primero (*L´Europe mathématique*) contra un frívolo estereotipo según el cual tras el brillo de la creación clásica no volvió a resplandecer la matemática hasta que aparecieron Descartes, Leibniz y Newton en el siglo XVII. Se esfuerza el segundo (*Contra los titanes de la rutina*) por resaltar la originalidad matemática española contra el juicio negativo de uno de sus cultivadores más preclaros, Julio Rey Pastor.

Saltar de Diofanto a Fermat es borrar de un plumazo las escuelas de ábaco, los calculadores de Oxford y la enseñanza de la matemática en París, Bolonia y Praga. Es, sobre todo, olvidarse del álgebra árabe, floreciente desde el siglo nono. Asimiladas la aritmética y la geometría helenísticas, los musulmanes refinan con métodos propios la teoría de las cónicas, la teoría de las paralelas, la perspectiva, la medición de áreas y volúmenes, los problemas isoperimétricos y las transformaciones. A uno u otro de esos dominios van ligados los nombres de Tabit ibn Qurra, Ibn Sahl o Ibn al-Haytam. La emergencia del análisis indeterminado (nuestro análisis diofántico) como capítulo distinto del álgebra se remonta a los sucesores de al-Khwarizmi, y en particular a Abu Kamil, quien, en su *Algebra*, resuelve 38 problemas diofánticos de segundo grado y describe sistemas de ecuaciones lineales. Medio siglo después, al-Karagi generaliza el análisis diofántico y formula la noción de polinomio. En la décima centuria se da culminación al análisis diofántico entero. Al-Hazin estudia los triángulos rectángulos y los problemas de números congruentes.

El cultivo de la matemática arraiga con fuerza, hacia finales del siglo XI, en las comunidades judías de España y del sur de Francia. Abraham bar Hiyya, formado en Zaragoza, prepara las bases de la lengua y la ciencia hebrea medieval. Nos han llegado la parte matemática de una suerte de enciclopedia científica que compiló y un tratado de geometría práctica. De una generación posterior a Hiyya, Abraham ibn Ezra, tudelano, escribió *El libro del número*, que se abre con una numeración decimal de posición con cero para abordar luego la multiplicación, división, adición, sustracción, fracciones, proporciones y raíces cuadradas.

Decisiva trascendencia revistió para el álgebra occidental, centrada en adelante en la solución de ecuaciones, la traducción al latín del *Kitab fi hisab al-jabr wa'l muqabala* de al-Khwarizmi. La tradición árabe pasa al Renacimiento a través de la figura de Fibonacci, quien redactó en análisis diofántico el *Liber quadratorum*, la principal aportación medieval a la teoría de números. El objeto del libro era resolver el sistema $x^2 + 5 = y^2$; $x^2 - 5 = z^2$.

Aunque *Contra los titanes de la rutina* no se propone relatar la historia

entera de la matemática en España, de sus páginas se extrae una idea de decorosa continuidad. Así, la geometría del Siglo de Oro alcanza el nivel que las circunstancias demandaban con Rodrigo Zambrano, autor de la primera traducción impresa al castellano de los *Elementos* de Euclides.

Más tarde, y comparado con cualquier otro centro europeo de su rango, no desmerece la docencia que imparten los jesuitas del Colegio Imperial. La férrea disciplina de la Compañía facilitaba el traslado de profesores de un país a otro. Si en Italia enseñaron españoles, a Madrid vinieron destinados Juan Bautista Cysat, Hugo Sempilius, Alexius Silvius Polonus, Jean Charles della Faille, Claude Richard y Francisco Antonio Camassa. El plan de estudios del Colegio establecía dos cátedras y especificaba las materias a aprender: "IX. De matemáticas, donde un maestro por la mañana leerá (enseñará) la esfera, astrología, astronomía, astrolabio, perspectiva y pronósticos. X. De matemáticas, donde otro maestro diferente leerá por la tarde la geometría, geografía, hidrografía y de relojes."

Prestaron especial atención a la geometría clásica. Claude Richard publicó una edición comentada de los *Elementos* de Euclides y otra de las *Cónicas* de Apolonio. Dejó manuscritos comentarios al tratado de Arquímedes *Sobre la esfera y el cilindro*, así como otros papeles sobre proyecciones de círculos en la esfera, trigonometría plana y esférica y de aritmética y álgebra (incluida la combinatoria). En la segunda mitad del siglo XVII, los jesuitas continuaron impulsando la actividad científica en nuestra patria. En 1659 Sebastián Izquierdo editó su *Pharus scientiarum*, que incluye un extenso tratado de combinatoria con algunas aportaciones originales. José de Zaragoza utilizó precozmente en su *Geometriae magnae in minimis* el concepto de centro mínimo de un sistema de puntos (o "centro de masas").

En 1698 Hugo de Omerique consagraba su *Analysis Geometrica* a la resolución de problemas geométricos mediante el método analítico, según la definición de Pappus. Evidencia allí un amplio conocimiento no sólo de Euclides y Pappus, sino también de sus modernos sucesores: Viète, Ghetaldi, Gregoire de Saint Vincent y Frans van Schooten. Entre 1680 y 1690 funcionan en Valencia tertulias o academias matemáticas. Sus protagonistas son tres clérigos: Baltasar de Iñigo, Tomás Vicente Tosca y Juan Bautista Corachán.

De los expertos del XVIII, Santiago Garma selecciona un trabajo de Miguel Alvear, otro de José Chaix y un tercero de José Mariano Vallejo, matemáticos sobre los que él ha publicado monografías valiosas en otros lugares. En su "Memoria sobre las Equaciones Superiores o método general para resolverlas", Alvear modifica el método de cálculo diferencial empleado por Bezout. Al desarrollo en serie de funciones transcendentes está dedicada la memoria de Chaix. Construyó éste su método sobre el empleado por Lagrange. La memoria consta de tres partes: en la primera ejecuta el desarrollo en serie del logaritmo y estudia la dependencia de éste respecto del valor de un módulo *M;* en la segunda expone el método general para transformar en serie cualquier función trascendente, y en la tercera aplica su método a las funciones a^x, log $(1 + x)$, sen x, cos x y tan x. Por fin, la de Vallejo es una "Memoria sobre la curvatura de líneas en sus diferentes puntos, sobre el radio de curvatura y sobre las evolutas, en que se expone esta teoría por los dos métodos, analítico y sintético, independientemente el uno del otro", precedida de una introducción en la que se expone el estado del problema hasta 1807.

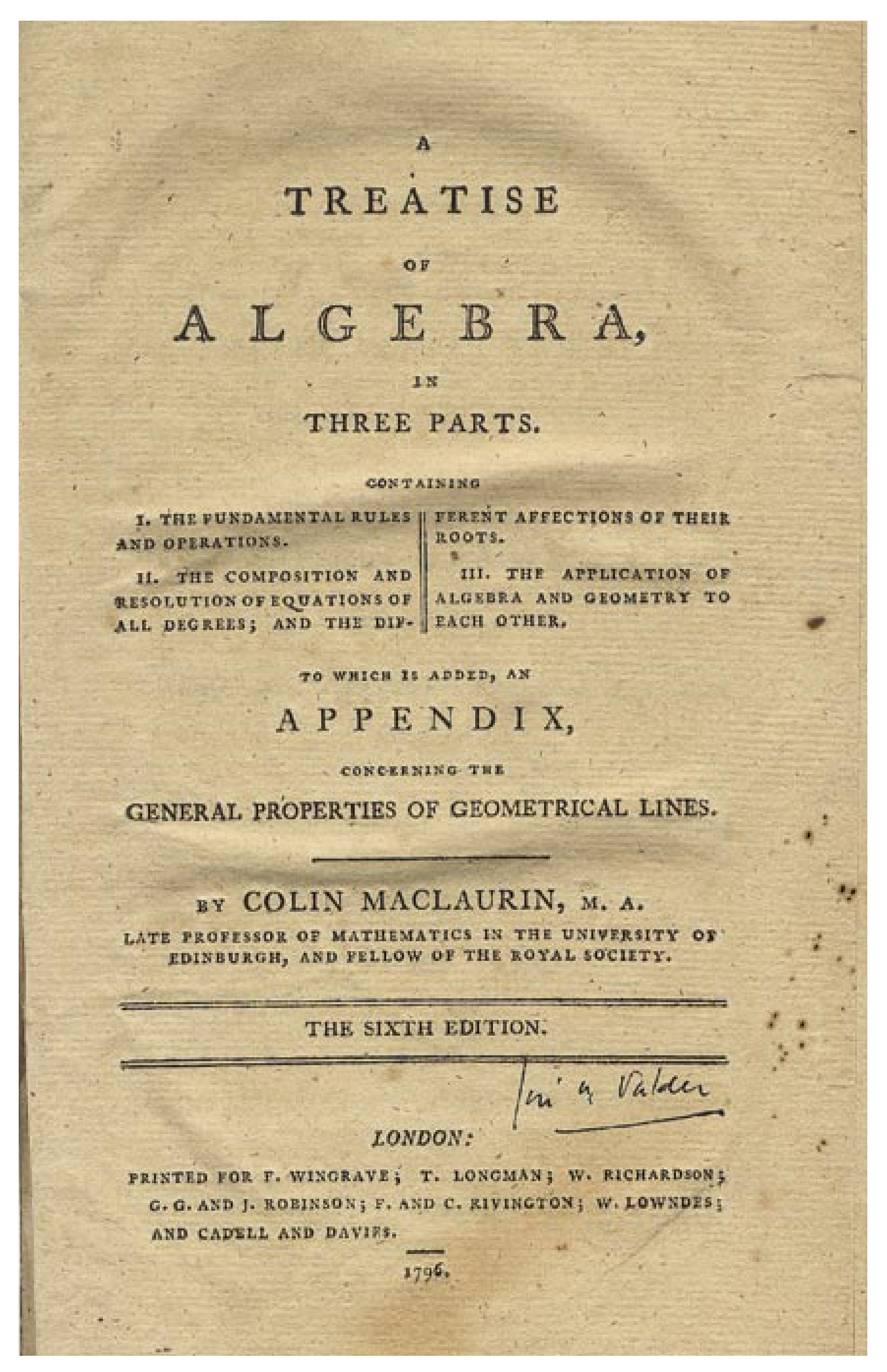
Lo mismo *L´Europe mathématique* que *Contra los titanes de la rutina* prolongan su campo de estudio hasta nuestros días. Entenderemos mejor, sin embargo, la trayectoria general si hacemos posada en ciertos nudos cruciales: Renacimiento, revolución científica y *Moderne Algebra*. Para ahondar en el primero podemos bajar del anaquel dos publicaciones recientes *Mathematik und Astronomie an der Universität Ingoldstadt im 15. und 16. Jahrhundert* y *Metaphysik und Mathematik bei Giordano Bruno*.

La historia de una especialidad en un centro universitario del pasado obliga a considerar aspectos institucionales —encuadre de la asignatura en el plan de estudios, importancia concedida a su enseñanza, etcétera— y doctrinales. Las universidades que se fundaron en las postrimerías del siglo XV, la de Ingoldstadt por ejemplo, tenían ante sí un doble espejo que imitar en lo concerniente al estudio de la matemática, con la entonces natural inclusión de la astronomía. Podían mirar a las universidades de París y Oxford, donde la docencia de la matemática se hallaba vinculada a las necesidades de la teología. O podían seguir el modelo de las universidades de Padua y Bolonia, que asociaban la matemática con la medicina.

Cada sistema entendía la función de la matemática de una forma distinta. En el primer caso, adquiría un rango propedéutico, ancilar de la lógica y las humanidades. En el segundo, devenida astrología, se hallaba al servicio de las exigencias de la curación. Al teólogo le interesaba conocer la aritmética para descifrar las obras del Creador, quien todo lo hizo, a tenor del texto sagrado, según cálculo y medida, amén de fijar exactamente la fecha de la Pascua. Al médico, cada vez con mayor proclividad hacia la iatromecánica, le importaba discernir los "días críticos", decisivos para el pronóstico. La Universidad de Ingoldstat recibe influencia de ambas tendencias. Y está abierta a la nueva matemática, la de las proporciones y latitudes de origen mertoniano. En su notable plantel, de inusitada habilidad técnica para la construcción de instrumentos, sobresalen los Apiano, padre e hijo.

Pero la aparición del *Ars magna* de Girolamo Cardano en 1545, dos años después de la publicación del *De revolutionibus* de Copérnico y del *De fabrica* de Vesalio, anunciaba ya el advenimiento de una nueva era también para el álgebra, que traería un lenguaje remozado, un método más riguroso y una relación dinámica con la geometría, sobre todo desde que François Viète sacara a la luz su arte analítica. Si Cardano apuntaba los principios para solucionar ecuaciones cúbicas y cuárticas, Viète atendía al lenguaje y ponía los cimientos del método. En *Isagoge in artem analyticem* sustituía por símbolos arbitrarios las palabras que habían formado el lenguaje del álgebra precedente, sin decidirse, no obstante, a acometer una ruptura total: para abreviar el cuadrado de una incógnita escribía *A quadratum*, *A quad* e incluso *Aq*. (En 1637 Descartes estableció la notación de los exponentes: x^2, x^3, etc.)

Seguidor de Ramón Llull y de Nicolás de Cusa, imprime Giordano Bruno su peculiar sello en el magma cabalístico y simbólico de una corriente de pensamiento —la hermética— que merodea a extramuros de la academia. Seguidor de Lucrecio, expone en verso su obra más característica: *De triplici minimo et mensura ad trium speculativarum scientiarum et multarum activarum artium principia libri V*; *De monade, numero et figura liber*, y *De innumerabilibus, immenso et infigurabili, seu De universo et mundis*



A

TREATISE

OF

ALGEBRA,

IN

THREE PARTS.

CONTAINING

I. THE FUNDAMENTAL RULES AND OPERATIONS.

II. THE COMPOSITION AND RESOLUTION OF EQUATIONS OF ALL DEGREES; AND THE DIFFERENT AFFECTIONS OF THEIR ROOTS.

III. THE APPLICATION OF ALGEBRA AND GEOMETRY TO EACH OTHER.

TO WHICH IS ADDED, AN

APPENDIX,

CONCERNING THE

GENERAL PROPERTIES OF GEOMETRICAL LINES.

BY COLIN MACLAURIN, M. A.

LATE PROFESSOR OF MATHEMATICS IN THE UNIVERSITY OF EDINBURGH, AND FELLOW OF THE ROYAL SOCIETY.

THE SIXTH EDITION.

LONDON:

PRINTED FOR F. WINGRAVE; T. LONGMAN; W. RICHARDSON; G. G. AND J. ROBINSON; F. AND C. RIVINGTON; W. LOWNDES; AND CADELL AND DAVIES.

1796.

"Por álgebra debe entenderse un método general de calcular a través de determinados signos y símbolos que, ideados con ese fin, han confirmado su idoneidad." (Cap. 1, parte 1ª del Treatise *de Colin McLaurin.)*

libri octo. De los propios títulos se desprende la tesis que respaldó con un estudio exhaustivo, hace 75 años, Xénia Atanassijevitch y retoma en su trabajo de grado Angelika Bönker-Vallon, a saber, que la filosofía de la naturaleza de Bruno, llevada a su radicalidad última, se confunde con la matemática.

Sobre la noción de mínimo gira toda la construcción teórica del nolano. Por tal entiende la unidad indivisible, el elemento primario de todo compuesto y el principio de toda existencia. Admite un triple mínimo: metafísico (o mónada), que es el mínimo como principio de cantidad; físico (o átomo) que es el mínimo como principio de la extensión de los cuerpos, y geométrico (o punto). La mónada es, por tanto, base de la metafísica; el átomo, de la física; el punto, de la geometría. A través de figuras inscritas en el texto, cree demostrar que el mínimo es la base de todas las cosas. Sorprende, si no fuera una contradicción más, el entusiasmo que manifiesta por Euclides y Fabricii Mordentis comparado con el repudio de la trigonometría, "esa infeliz arte de los triángulos", denigrada en *Articuli adversus mathematicos*.

Pese a él mismo, Bruno se convierte para los ingleses en cabeza de puente entre Renacimiento y revolución científica. Del álgebra en ese tiempo y lugar ha escrito un libro precioso Helena Pycior con el título *Symbols, Impossible Numbers, and Geometric Entanglements*, en el que cobran vida y contexto William Oughtred, Thomas Harriot, John Collins, John Pell, John Kersey, John Wallis, Thomas Hobbes, Isaac Barrow, Isaac Newton, George Berkeley, Robert Simson, Colin MacLaurin, Saunderson y John Colson.

El estilo simbólico de Viète prendió en la imaginación de Oughtred y Harriot. Ambos escribieron sendos manuales sobre el arte analítico el mismo año de 1631. La *Clavis mathematicae* de Oughtred, traducida de inmediato como *The Key of the Mathematicks*, fue el texto más influyente entre la aparición de los logaritmos de John Napier y las investigaciones algebraicas de Wallis. *The Key* daba a conocer los nuevos símbolos de álgebra, unos de inventiva personal y otros tomados de Viète. Se advierte ese mismo equilibrio cuando acepta los números negativos pero sólo raíces positivas de las ecuaciones. Más decidido, Harriot, autor de *Artis analyticae praxis*, utilizó raíces negativas e imaginarias. El mismo resolvió una ecuación cuártica con raíces positivas, negativas y dos complejas.

La *Key* de Oughtred y la *Praxis* de Harriot habían quedado prematuramente envejecidas tras la aparición de *La géométrie* de Descartes de 1637. Consciente de ese desfase, Collins animó a Isaac Newton y a Wallis que escribieran un texto para ingleses. Alentó asimismo a Pell a terminar la traducción de un álgebra alemana y a Kersey para que concluyera su manual. Collins murió en 1683. Las dos obras en inglés que él ayudó a inspirar —el *Treatise of Algebra* de Wallis y la *Universal Arithmetick* de Newton— se publicaron en 1685 y 1707, respectivamente. Wallis introdujo los números imaginarios y confirió al álgebra su primera formulación aritmética. La dividió en dos partes: "álgebra pura", que se basaba en la

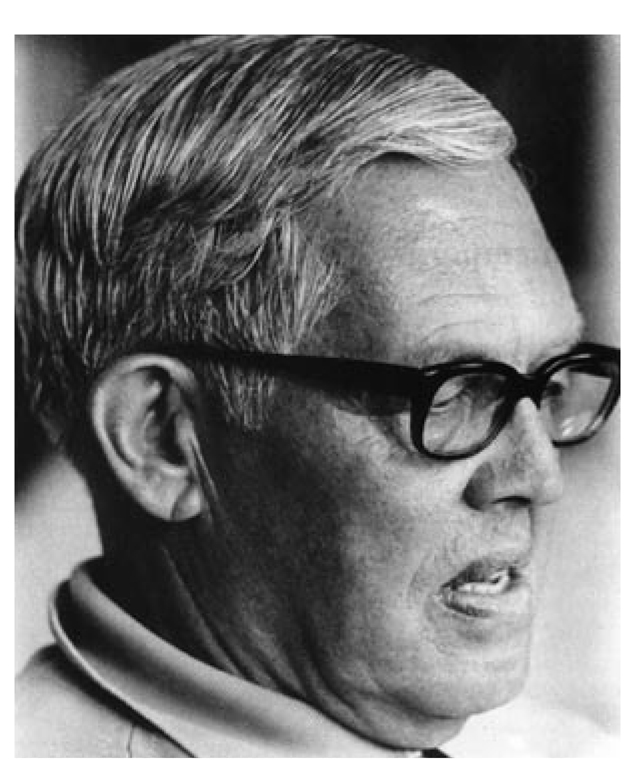
aritmética, y sus aplicaciones, incluida la geometría.

Antes de la conversión cartesiana de Newton otros matemáticos ingleses se habían asomado a la geometría analítica y a la teoría moderna de la ecuación. A lo largo de *La géometrie* y en particular en su libro II, Descartes elevó el simbolismo algebraico a nuevas alturas de orden y simplicidad. Empleó las primeras letras del alfabeto para denotar cantidades conocidas y las últimas letras para denotar incógnitas. Propuso la "regla de Descartes de los signos" y enunció el teorema fundamental del álgebra sobre ecuaciones y raíces, que implicaba la aceptación de los números negativos.

Mediada la centuria surgió una reacción geométrica y sintética contra el álgebra. La abanderaron Hobbes y Barrow. Hobbes trasladó al campo matemático su apego a la experiencia inmediata y sus inclinaciones nominalistas. Las opiniones de Barrow dependían también del empirismo que primaba la geometría en cuanto ciencia fundada en los sentidos; al subordinar la aritmética a la geometría, limitaba los números a meros signos de magnitud. Para Hobbes la geometría no trataba de ideas abstractas de punto y línea, sino de puntos y líneas sensibles cuyas partes o anchuras eran ignoradas por los matemáticos. Las generalizaciones sobre tales puntos y líneas dependían del empleo de los nombres universales "punto" y "línea" para denotar puntos y líneas específicos.

Siendo ya profesor lucasiano, Newton mezclaba en sus clases álgebra geométrica cartesiana con álgebra aritmética de Wallis, aunque no ocultaba su preferencia por la geometría analítica. Y así, construyendo sobre el tratamiento de Wallis de las series, llegó por interpolación al teorema del binomio, que generalizó a exponentes reales y lo convirtió en pieza clave del cálculo diferencial. Con respecto a los números imaginarios mantuvo una actitud ambigua, admitiendo por supuesto la utilidad práctica de $\sqrt{-1}$. Colin MacLaurin retomó en Escocia la defensa de la matemática newtoniana. En el *Treatise of Fluxions* culminaba el desarrollo geométrico del cálculo diferencial, de cuyos fundamentos se ocupó también en el *Treatise of Algebra*.

Entre los matemáticos continentales que recibieron la influencia de McLaurin sobresalió *Bernard Bolzano*, cuyos apuntes manuscritos en 1814 empezamos a conocer. Nada de extraño tiene, pues, que en las páginas iniciales del volumen de reseña —que recoge textos de geometría elemental, geometría superior y fundamentos de cálculo infinitesimal—, donde pasa sumaria revista a la historia, se detenga con morosa apreciación en la figura del escocés.



Retrato de G. G. Lorentz realizado por Ward Cheney, Austin, 1980

Bolzano nació en Praga, en cuya universidad estudió ciencias y teología. Se ordenó sacerdote en 1804. Mente original y penetrante, sus ideas, más intuidas que desarrolladas, condicionarían el curso de la matemática del XIX, una vez salieron a la luz. Así, el análisis, estructurado luego por Cauchy, Abel y Dirichlet. O las propiedades de las funciones, cálculo diferencial, definición de continuidad, noción de límite, concepto de derivada y un largo etcétera lógico.

En *Paradojas del infinito*, publicadas tres años después de su muerte, se dan los primeros pasos que habrían de conducir a la teoría de conjuntos. Defendió la existencia de infinitos reales y habló de conjuntos arbitrarios. Definía allí la noción general de equipotencia de dos conjuntos y la aplicaba al caso de dos intervalos compactos en el conjunto de los números reales. El tono general de esta obra, escribe Bourbaki y repite Klein, es en cualquier caso más filosófico que matemático.

Para filosófica, o metamatemática, la tesis doctoral de Corry sobre teoría de la categoría, reelaborada en *Modern Algebra and the Rise of Mathematical Structures*. Las estructuras constituyen el último eslabón de la serie de enfoques del álgebra. A lo largo del siglo XVIII ésta se centraba en las ecuaciones polinómicas con las técnicas empleadas para solucionarlas y en el análisis de las relaciones entre raíces y coeficientes de un polinomio. El siglo XIX agregó a esos problemas otros nuevos: invariantes, determinantes, etc. En paralelo a ello, la teoría de números se ocupaba de problemas de la divisibilidad, congruencia y factorización. Por fin, el "álgebra estructural" suministraría un nuevo marco forjado con la teoría del ideal, en el seno de la corriente que va de Richard Dedekind a Emmy Noether.

La idea contemporánea de estructura matemática, su significado, sus orígenes y su desarrollo (Bourbaki, Ore y la teoría de la categoría) constituyen los temas principales del libro de Corry, que recoge, dicho sea de paso, notables aportaciones españolas (Javier de Lorenzo, Josep Pla.) Resume en cinco las etapas recorridas hasta la definición del concepto de estructura: penetración de los métodos derivados de las obras de Galois en el estudio de las ecuaciones polinómicas; introducción y elucidación gradual de las nociones de grupo y campo, con la adopción concomitante de definiciones matemáticas abstractas (una tendencia asociada a los nombres de Dedekind, Heinrich Weber, Georg Ferdinand Frobenius, Ernst Steinitz y otros); refinamiento de métodos para abordar invariantes de sistemas de formas polinómicas, avanzadas por la escuela algorítmica de Paul Gordan y Max Noether; sistemática adopción de los métodos de teoría de conjuntos y otros planteamientos axiomáticos involucrados en las obras de Georg

Cantor y David Hilbert; por último, estudio sistemático de la factorización en dominios generales, liderada por Emmy Noether y Emil Artin.

Puesto que se trata de un trabajo filosófico no le interesa tanto el contenido del álgebra cuanto la reflexión sobre las razones que inducen a admitir su contenido; es decir, no tanto la matemática cuanto la metamatemática, lo que él llama la imagen del conocimiento algebraico o conjunto de razonamientos sobre la disciplina *qua* disciplina.

Durante los años veinte cristalizó en Alemania una nueva imagen del álgebra entre los discípulos de Emmy Noether en Göttingen. Alcanzó mayor audiencia cuando, en 1930, Bartel L. van der Waerden publicó *Moderne Algebra*. La esencia del enfoque residía en el reconocimiento de un manojo de conceptos (grupos, anillos, campos, etc.) como "variedades" singulares de estructuras algebraicas, cuya último transformación, la teoría de la categoría de la que hoy vivimos, se adivinaba ya a comienzos de los sesenta: "Entre 1920 y 1940 se produjo, afirmaba en 1961 Jean Dieudonné, una completa reforma de la clasificación de diferentes ramas de la matemática, urgida por una nueva concepción de la esencia del pensamiento matemático, que surgió de las obras de Cantor y Hilbert. De Hilbert emergió la axiomatización sistemática de la ciencia matemática en su integridad y el concepto fundamental de estructura matemática. Lo que quizás ustedes no sepan es que la matemática está a punto de acometer una segunda revolución, a saber, la que libera a la matemática del corsé en que la ha encerrado el 'conjunto'. Me refiero a la teoría de *categorías y functores*, cuyo alcance es todavía muy pronto para ponderar."

Sobre cuestiones de método reflexiona también Lorentz en *Mathematics from Leningrad to Austin*. Pero es la suya una meditación de quien ha dedicado más de sesenta años al estudio de la sumación y teoría de números, a la interpolación, al análisis real y funcional y a la teoría de la aproximación.

Lorentz representa la potencia matemática de la escuela de entreguerras de Leningrado, donde nació en 1910, hijo de un ingeniero de ferrocarriles y noble rusa. Comenzó su carrera en Tbilissi, con Muskhelishvili y Razmadze, quien solía iniciar el curso de cálculo diferencial con una presentación de Dedekind. De allí pasó a Leningrado, en cuya facultad de exactas se graduó en 1931. Corrieron malos tiempos entre 1930-33. Se disolvieron las sociedades matemáticas de Leningrado y Moscú. Egorov, que presidía la segunda, murió en la cárcel. Con terminología socialista al uso, la teoría de las funciones reales fue declarada reaccionaria; la teoría de funciones complejas, progresista.

Alejado de la política estudia los espacios de Banach y asiste al seminario que A. A. Markov imparte sobre topología moderna. En 1937 detienen a su padre quien, tras un simulacro de juicio, es condenado a ocho años y en 1938 muere en un campo de concentración.

Hasta 1942 Lorentz apenas puede escribir nada con ilusión. Sólo piensa en huir. En 1944, tras un breve período en un campo de refugiados polaco, obtiene una plaza de asistente de Kamke en Tubinga. Allí se doctora y accede a la "habilitación" cuando la ciudad germana está bajo ocupación francesa. Se le concede el estatuto de "apátrida" con cuyo visado se moverá hasta que reciba la nacionalidad estadounidense. En esa primera época germana, amén de las clases sobre espacios de Banach, escribe sobre ecuaciones diferenciales, sumación (a propósito de los teoremas directos sobre métodos de ésta toma en consideración un estudio de Rey Pastor del año 1931) y series de Fourier. En 1949 acepta una plaza en la Universidad de Toronto. De aquí pasa a la Wayne de Detroit, luego a Syracuse y por fin a Austin.

No va con su talante volcarse sobre la ola de la moda, antes bien "trato de entender partes de teorías establecidas y desentrañar algo que en ellas valga la pena". El creador de los llamados en su honor "espacios de Lorentz", de funciones mensurables, sabe distanciarse del encerado. Distingue dos tipos de pensamiento creador, ambos necesarios y complementarios: el lógico y el intuitivo. El primero, que se esfuerza por reducir algo a una trivialidad, avanza gradualmente y por etapas a la manera de una partida de ajedrez. El segundo pone en conexión ideas muy alejadas en una suerte de inspiración instantánea. Matemáticos del primer estilo serían Weierstrass y Cantor; del segundo, Riemann y Poincaré. Las propias disciplinas muestran, a su vez, un carácter predominantemente lógico o predominantemente intuitivo. La teoría de conjuntos es lógica; la teoría de números, intuitiva.

LUIS ALONSO

Divulgación científica

Agujeros negros

PRISONS OF LIGHT: BLACK HOLES, por Kitty Ferguson. Cambridge University Press, Cambridge, 1996.

Libro de divulgación sobre los agujeros negros, *Prisons of light* carece de aparato formal. ¿A quién va destinado este libro? Evidentemente no a quien sepa algo de física y sienta un interés mínimo por el tema. Ahora bien, si una editorial de prestigio se atreve a publicarlo es que debe de haber un número potencial de lectores notable.

Da por sobreentendido lo que a muchos se les escapará. Así, cuando habla del corrimiento hacia el rojo, señala que con él algunas estrellas desaparecerán del espectro visible, pero no recuerda que otras aparecerán. Cuando habla de curvatura, nunca queda explícito que es curvatura del espacio-tiempo, ya que pone ejemplos de curvatura de menos dimensiones que las cuatro del espacio-tiempo y ello induce a pensar en curvatura del espacio.

Puede que la dificultad básica sea el que no se distingue entre lo que está explicado con cierta claridad con lo que sólo está descrito sin mayor detenimiento. Con todo, la lectura del libro no es inútil, ya que recopila varios razonamientos que pueden emplearse en contextos más avanzados. La propia autora aconseja que para entender mejor el corrimiento hacia el rojo durante el colapso de una estrella se consulte un artículo de *Investigación y Ciencia*.

Dedica buena parte del libro a los estudios e investigaciones sobre los candidatos a agujeros negros, que cataloga en tres apartados: estrellas, galaxias activas o cuásares y galaxias normales. Compila abundantes datos, que deberán ponerse al día con las incesantes novedades que no dejan de producirse. Los cuásares que emiten en radio se asocian con agujeros negros supermasivos y los que emiten en visible quedan en estudio. La medición en el futuro de ondas gravitatorias también aclararía esta asociación cuásares-agujeros negros. Entre las galaxias normales, nuestras vecinas M31 y M32 son buenas candidatas para albergar en su centro un agujero negro masivo; en su infancia a lo mejor fueron galaxias muy activas pero ahora no.

LUIS MAS

Samuel Musa

Monitores de cristal líquido de matriz activa

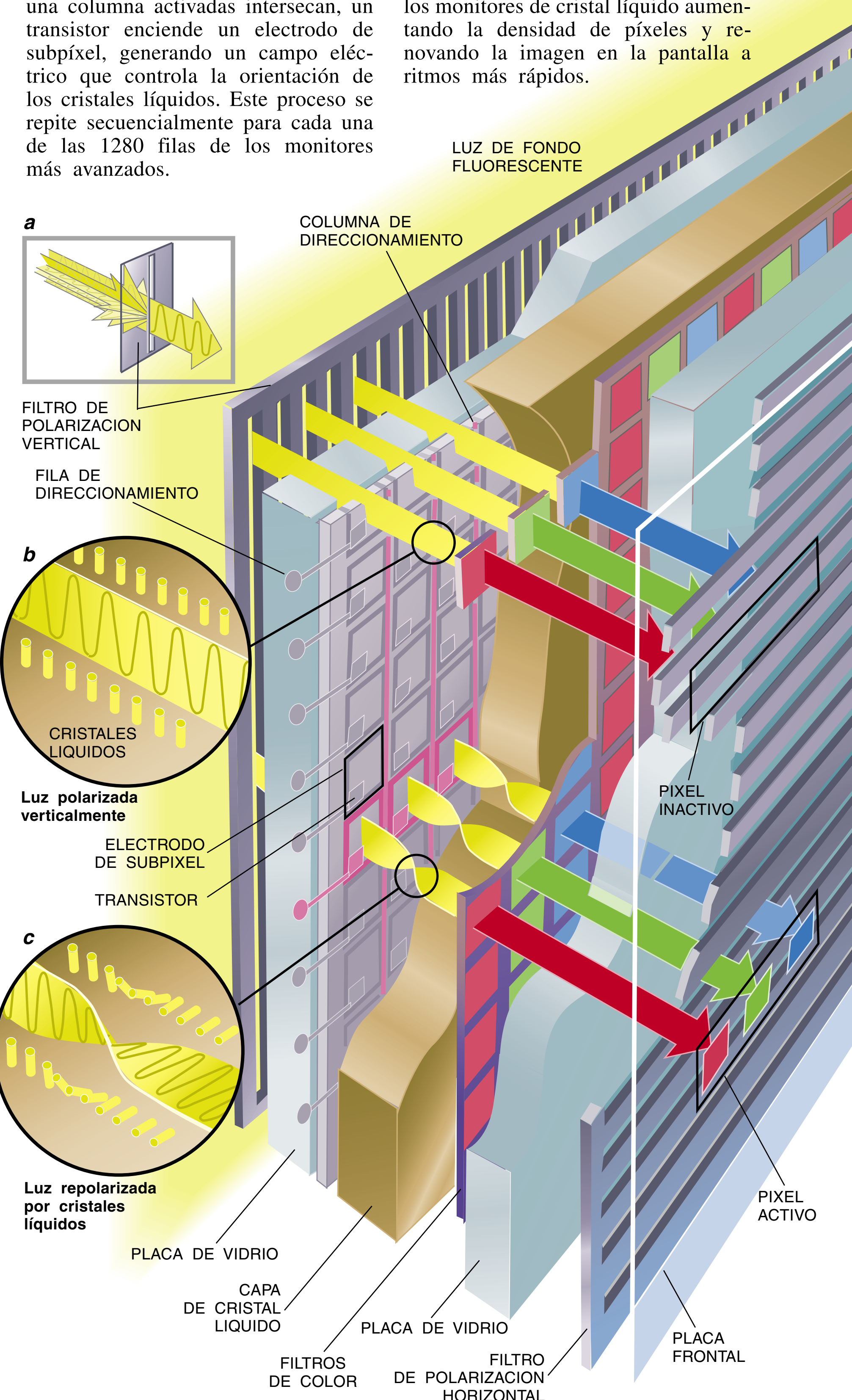
En los ordenadores portátiles comienzan a ser habituales los monitores de cristal líquido de matriz activa. Merced a dos propiedades de los fluidos orgánicos llamados cristales líquidos, éstos resultan idóneos para emplearlos como minúsculos conmutadores que encienden y apagan los elementos de imagen, o píxeles. La primera es que los cristales líquidos son transparentes, pero pueden alterar la orientación de la luz polarizada que los atraviesa. La segunda es que podemos cambiar la alineación de sus moléculas aplicando un campo eléctrico.

En un monitor de color los cristales líquidos se alojan entre dos placas de vidrio, cuyas caras externas se han cubierto con filtros de polarización. A través de éstos sólo puede pasar luz con una determinada polarización (*a*). Dentro de las placas hay láminas de electrodos transparentes de película delgada y filtros de color, los cuales forman unas zonas de elementos de imagen muy pequeñas, los subpíxeles. Un conjunto de un subpíxel rojo, uno verde y uno azul crea un elemento de imagen a color completo, o píxel. La actividad combinada de los subpíxeles define el color que cada píxel transmite.

En la parte trasera del monitor hay una iluminación fluorescente de fondo. En los píxeles inactivos, la luz atraviesa el filtro de polarización trasero, los cristales líquidos (*b*) y los filtros de color, sólo para que el filtro de polarización delantero la bloquee (absorba). A la vista, esos píxeles aparecen oscuros. Cuando un píxel se activa, los cristales líquidos reorientan sus posiciones y a su vez repolarizan la luz de tal modo que ésta puede atravesar el filtro de polarización delantero (*c*).

La matriz activa proporciona un método superior para direccionar (activar) electrónicamente una red de píxeles. Para que en la pantalla aparezca una imagen, es preciso que una fila de píxeles reciba la tensión eléctrica adecuada. A la vez, el soporte lógico que haya en el ordenador decreta que se aplique una tensión eléctrica a las columnas donde haya subpíxeles activos. Cuando un fila y una columna activadas intersecan, un transistor enciende un electrodo de subpíxel, generando un campo eléctrico que controla la orientación de los cristales líquidos. Este proceso se repite secuencialmente para cada una de las 1280 filas de los monitores más avanzados.

Puede mejorarse la resolución de los monitores de cristal líquido aumentando la densidad de píxeles y renovando la imagen en la pantalla a ritmos más rápidos.



Seguiremos explorando los campos del conocimiento



AGREGADOS METALICOS Y NUMEROS MAGICOS, por Matthias Brack

La investigación de diminutos trozos de metal puede ayudar a los físicos a entender las diferencias entre las propiedades de átomos aislados y los materiales sólidos.

EN DEFENSA DE LOS VESTIGIOS DE VIDA EN MARTE, por Everett K. Gibson Jr., David S. McKay, Kathie Thomas-Keprta y Christopher S. Romanek

Un meteorito encontrado en la Antártida presenta pruebas claras de que en Marte hubo, si no sigue habiendo, vida microbiana.

SIGUIENDO EL ATAQUE DE UN DINOSAURIO, por David A. Thomas y James O. Farlow

Los trabajos de un escultor y un paleontólogo revelan detalles de una escaramuza de hace 100 millones de años.

LA EXPLOTACION DEL PUNTO CERO DE ENERGIA, por Philip Yam

El espacio vacío está lleno de energía. Pero, ¿se podrá aprovecharla, como proponen algunos? Seguramente no.

PLANTAS RESISTENTES A INSECTOS, por Juan J. Estruch

Se han obtenido plantas con propiedades insecticidas capaces de controlar especies muy dañinas. La siembra de sus semillas constituye el primer paso para el establecimiento de una agricultura rentable.

EL SINDROME DE WILLIAMS Y EL CEREBRO, por Howard M. Lenhoff, Paul P. Wang, Frank Greenberg y Ursula Bellugi

Para adentrarse en las complejidades de la organización del cerebro, los investigadores empiezan a interesarse de una manera especial por una enfermedad hasta ahora poco conocida.

INFORME ESPECIAL: COLOSOS DE LA INGENIERIA CIVIL

EL PUENTE COLGANTE MAS LARGO, por Satoshi Kashima y Makoto Kitagawa

LOS EDIFICIOS MAS ALTOS DEL MUNDO, por Cesar Pelli, Charles Thornton y Leonard Joseph

CONSTRUCCION DE UNA NUEVA ENTRADA A CHINA, por John J. Kosowatz

